



Tielaitos

Veikko Hentilä, Eero Slunga, Anton Palolahti

Roudan vaikutusten mallintaminen

**Tielaitoksen
selvityksiä**

8/1994

Helsinki 1994

Geokeskus

Tielaitoksen selvityksiä
8/1994

Roudan vaikutusten mallintaminen

Tielaitos
Geokeskus

Helsinki 1994

Raportin tuotanto:

Anton Palolahti, luvut 1-3 ja 8

Veikko Hentilä, luvut 4-7 ja 9

ISSN 0788-3722

ISBN 951-47-8741-2

TIEL 3200219

Painatuskeskus Oy

Helsinki 1994

Julkaisun kustannus ja myynti:

Tielaitos, hallinnon palvelukeskus,

painotuotepalvelut

Telefax (90) 1487 2652

Tielaitos

Opastinsilta 12 A

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. vaihde (90) 148 721

Asiasanat kavätkantavuus, roudan syvyys, routanousu

Tiivistelmä

Tutkimus on tehty teknillisen korkeakoulun rakennus- ja maanmittausosaston pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratoriossa. Tutkimuksen tavoitteena on ollut tarkastella pohjamaan kevätkantavuusmoduulin määritystä ja siihen vaikuttavia tekijöitä, tutkia aikaisemmin kehitetyn jännitystilaan perustuvan mallin toimivuutta kevätkantavuuskertoimen määrittämiseksi sekä tarkentaa mallin parametrien määritystä. Lisäksi tavoitteena on ollut CBR-kokeen käyttömahdollisuuksien selvittäminen sekä roudan syvyyden ja routanousun arviointiin käytettyjen menetelmien kelpoisuuden tarkastelu.

Tutkimuksessa on käytetty hyväksi aikaisemmista töistä saatuja tuloksia. Tutkimustuloksia on täydennetty kuudessa eri kohteessa. Tutkimuskohteiden pohjamaanäytteistä on tehty luokitusominaisuuksien ja CBR-kantavuusarvojen määritykset sekä routanousukokeet puuttuvilta osin.

Arvioitaessa dynaamista kantavuusmoduulia CBR-kokeen tulosten perusteella päästiin kohtalaiseen tarkkuuteen. Arvioitaessa staattista kantavuusmoduulia vastaavasti tarkkuus ei ollut aivan yhtä hyvä.

Pohjamaan kantavuus alenee keväisin roudan sulamisen johdosta, koska vedellä kyllästetyn pohjamaan huokospaine kasvaa ja tehokkaat jännitykset pienenevät. Aikaisempien tutkimusten ja tämän tutkimuksen tulosten perusteella kevätkantavuuskerroin voidaan likimääräisesti arvioida myös maapohjassa vallitsevaan jännitystilaan perustuvan mallin avulla. Mallin toimivuutta eri olosuhteissa tulisi kuitenkin vielä tutkia.

Tutkimuksessa on vertailtu eri menetelmiä roudan syvyyden ja routanousun arvioimiseksi. Ne saadaan arvioitua esimerkiksi maan lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja pakkasmäärään perustuvilla menetelmillä. Roudan syvyys arvioitiin parhaiten Stefanin yhtälön avulla. Routanousu arvioitiin parhaiten maan kerroksellisuuden huomioivalla laskentatavalla.

Tilastollisia menetelmiä pyritään käyttämään alustavassa ja vähemmän tarkkuutta vaativassa suunnittelussa routanousuun liittyvien parametrien likimääräiseen arvioimiseen. Tilastollisilla menetelmillä tehty routasuureiden arvioinnit antoivat ristiriitaisia tuloksia. Tilastolliset menetelmät tulisi kalibroida käyttöolosuhteissa.

Raportin 8. kappaleessa on käsitelty tutkimustarvetta ja tutkimusten tämänhetkistä tilannetta.

Alkusanat

Tutkimushankkeen tilaaja ja rahoittaja on ollut tielaitoksen geokeskus. Tilaajan edustajana on toiminut ylitarkastaja Reijo Orama. Toteutuksesta on vastannut Teknillisen korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorio. Routanousukokeet on tehty VTT:n tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratoriossa.

Tämä tutkimusraportti kattaa ensimmäisen osan Teknillisessä korkeakoulussa tehtävästä projektista "Roudan vaikutusten mallintaminen". Toisen osan muodostaa routanousun matemaattista mallintamista käsittelevä osuus, joka tehdään rakenteiden mekaniikan laboratoriossa.

Tehty tutkimus täydentää "Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus" -projektia /Palolahti et al. 1993/, jonka tavoitteena oli selvittää roudan sulamisen vaikutuksia tien pohjamaan kantavuuteen ja kartoittaa sen määrittämiseen soveltuvat menetelmät sekä tutkimusta "Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen" /Friberg & Slunga 1989/, jossa käsiteltiin maalajien routivuutta lähinnä routanousun kannalta.

Espoossa tammikuussa 1994

Teknillinen korkeakoulu
Pohjarakennus ja maamekaniikka

Sisältö

1 JOHDANTO	11
2 ROUTAANTUMISEN JA ROUDAN SULAMISEN FYSIKAALINEN TAUSTA	12
2.1 Routanousun mekanismi	12
2.2 Sulamisperhmenemisen mekanismi	13
3 TUTKIMUSMENETELMÄT	15
3.1 Yleisperiaatteet	15
3.2 Menetelmien käyttö	16
3.2.1 Luokitus- ja hydrauliset ominaisuudet	16
3.2.2 Epäsuora laboratoriokoe	17
3.2.3 Routanousukoe	18
3.2.4 Kenttäkokeet	19
4 TUTKIMUSAINESTO	22
4.1 Aikaisemmat tutkimukset	22
4.2 Täydentävät tutkimukset	23
4.2.1 STINA-projektin tutkimuskohteet	23
4.2.2 Pohjamaan kantavuus-projektin tutkimuskohteet	23
4.2.3 Kevätkantavuusprojektin kohteet	24
5 KEVÄTKANTAVUUDEN MÄÄRITYS	25
5.1 Aikaisemmat tutkimukset	25
5.2 Täydentävät tutkimukset	27
5.2.1 Kontula	27
5.2.2 Nummi-Pusula	28
5.2.3 Palojärvi-Olkkala pl 100+17	29
5.2.4 Palojärvi-Olkkala pl 114+80	29
5.2.5 Palojärvi-Olkkala pl 100+40	29
5.2.6 Otaniemi	30
5.3 Pohjamaan kantavuusmoduulin määrittäminen eri menetelmillä	30
5.3.1 Kokemusperäinen kantavuusmoduulin arviointi	30
5.3.2 CBR-kokeen perusteella arvioitu kantavuusmoduuli	31
5.3.3 Moduulin määrittäminen levykuormituskokeilla	34
5.4 Kevätkantavuuskerroin	35
5.4.1 Levykuormituskokeiden tulosten perusteella lasketut kevätkantavuuskertoimet	35
5.4.2 Teoreettinen kevätkantavuuskertoimen arviointi	36

6 ROUDAN SYVYYDEN JA ROUTANOUSUN ARVIOIMINEN	45
6.1 Maan lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja pakkasmäärään perustuvat menetelmät	45
6.1.1 Roudan syvyyden arviointi	45
6.1.2 Routanousun arviointi	56
6.2 Tilastolliset menetelmät	64
7 TULOSTEN TARKASTELU	68
8 TUTKIMUSTARVE	72
9 YHTEENVETO	75
KIRJALLISUUS	77
LIITTEET	81

MERKINNÄT

\bar{B}	huokospaineparametri
C	maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_f	jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
C_u	sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m^3K
CBR	CBR-kokeen kantavuusarvo, %
E	muodonmuutosmoduuli, kimmomoduuli, MN/m^2
E_{fwd}	pohjamaan kantavuusmoduuli, pudotuspainolaite, MN/m^2
$E_{1,2}$	levykuormituskokeella määritetty kantavuusmoduuli, MN/m^2
E_c	levykuormituskokeella määritetty kantavuusmoduuli kokonaispainuman perusteella, STINA-kuormituskoe, MN/m^2
F	pakkasmäärä, Kh
I_p	plastisuusluku, %
L	faasinmuutoslämpö, kJ/m^3
L_w	veden jäätymislämpö, kJ/m^3
M_r	dynaaminen kimmomoduuli, MN/m^2
P	kuorma, kN
R_f	hienoustekijä
S	maan ominaispinta-ala, m^2/g
SP	segregaatiopotentiaali, mm^2/Kh
S_r	kyllästysaste, %
T	lämpöastesumma, Kh
V_o	keskimääräinen lämpötila, K
V_s	pakkaskauden keskimääräinen lämpötila, K
Z_f	roudin syvyys, m
Z_t	sulamissyvyys, m
Z_o	jäätyneen maakerroksen alkuperäinen paksuus, m
a,b,c	kertoimia
h	kokonaisroutanousu, mm
h_i	huokosveden jäätymisestä aiheutunut routanousu, mm
h_s	segregaatoroutanousu, routimisnousu, mm
k	kerroin
k	vedenläpäisevyyskerroin, m/s
m	kerroin
n	kerroin
n	huokoisuus
p	kuormitus, MPa
pF	alipaineen (cm vesipatsasta) kymmenjärjestelmän logaritmi
p_s	standardimateriaalin painumaa vastaava kuormitus, MPa
q	kokonaiskuorma, kPa
q	olomuodonmuutoslämpö, Wh/m^3
q_+	sulasta maasta routarajalle tuleva lämpövuoto
q_-	jäätyneen kerroksen läpäisevä lämpövuoto
q_f	huokosveden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto
q_s	routarajalle imeytyneen veden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto
r_u	huokospainesuhde
s	painuma, mm
u	kokonaishuokospaine, kPa

u_0	ennen jännitystilän muutosta vallinnut huokospaine, kPa
Δu	jännitystilän muutoksen aiheuttama huokospaineen muutos, kPa
v	virtausnopeus, m/s
w	vesipitoisuus, %
w_u	jäätymättömän veden määrä, %
w_L	juoksuraja, %
α	lämpösuhte
σ_c	pohjamaan konsolidaatiojännitys, kN/m ²
σ_0	pohjamaan pinnalla vallitseva pystysuora kokonaisjännitys, kN/m ²
σ_z	pystysuora jännitys maan omasta painosta syvyydellä z, kN/m ²
$\Delta\sigma$	liikenteen aiheuttama lisäjännitys pohjamaan pintaan, kN/m ²
σ_d	deviatorinen jännitys, MPa
γ	tilavuuspaino, kN/m ³
λ	lämmönjohtavuus, W/mK
λ_f	jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_u	sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
Λ	lämpövakio
μ	parametri
ν	Poissonin luku
ρ_d	kuivavirtotiheys, t/m ³
ρ_w	veden tiheys, t/m ³

1 JOHDANTO

Routivan maan jäätyessä maahan kertyy jäälinsien muodossa runsaasti vettä ja maanpinta nousee. Roudan sulaessa vesi vapautuu ja sulavan maan kantavuus sekä muodonmuutosvastus heikkenevät. Routanousu ja sulavan maan pehmeneminen on merkittävä ongelma monessakin yhteydessä, mutta erittäin suuri vaikutus niillä on tie- ja liikennealueiden pohjamaan käyttäytymiseen. Tien rakennekerrokset tehdään yleensä routimattomista materiaaleista, joissa em. ongelma on vähäisempi, mutta pohjamaa on useimmiten routivaa. Tarkasteltaessa ongelmien teknillisiä ratkaisuja korostuu tarve tutkia ja täsmentää maalajin ja rakenteen kantavuuteen ja sulamispehmenemiseen käytettävien arviointimenetelmien ja erilaisten vuoro-
suhteiden soveltuvuutta.

Tehty tutkimus täydentää "Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus" -projektia /Palolahti et al. 1993/, jonka tavoitteena oli selvittää roudan sulamisen vaikutuksia tien pohjamaan kantavuuteen ja kartoittaa sen määrittämiseen soveltuvat menetelmät sekä tutkimusta "Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen" /Friberg & Slunga 1989/, jossa käsiteltiin maalajien routivuutta lähinnä routanousun kannalta.

Tutkimuksessa on hyödynnetty aikaisempien tutkimusten /STINA 1977, Jämsä 1985, Palolahti et al. 1993/ tuloksia ja havaintokohteita, mutta tutkimuksia on myös pyritty täydentämään puutteellisilta osin. Valituista koekohteista on otettu pohjamaanäytteitä jatkotutkimuksia varten. Tutkimusten avulla on pyritty selvittämään olosuhteiden, maalajiominaisuuksien sekä jännitystilän vaikutuksia pohjamaan kantavuusmoduuliin ja routivuusominaisuuksiin.

2 ROUTAANTUMISEN JA ROUDAN SULAMISEN FYSIKAALINEN TAUSTA

2.1 Routanousun mekanismi

Routivan maan routiessa maahan kerääntyy ylimääräistä vettä jäälinsien muodossa. Mitä routivampaa maa on, sitä enemmän routarajalle imeytyy vettä ja sitä suurempi on routanousu. Jäätyneen maan kantavuus on hyvä (jäykkyys suuri).

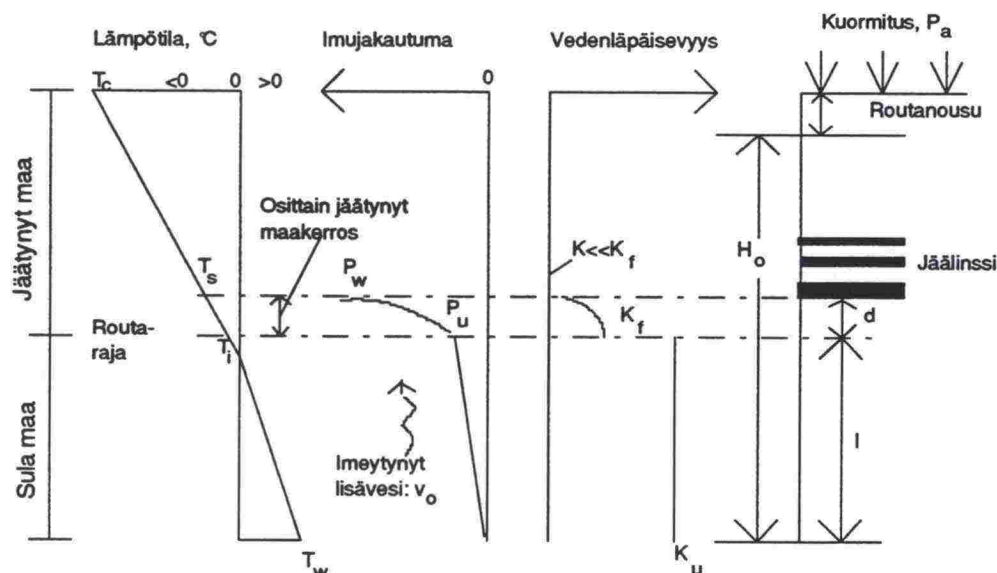
Maan jäätyessä jäätyneen ja sulan maan rajapintaa nimitetään routarajaksi, jossa maan lämpötila vastaa huokosveden jäätymispistettä. Huokosveden jäätymistä ylläpitää lämpövuoto jäätyneessä kerroksessa. Maassa olevan veden epäpuhtauksien sekä siihen kohdistuvien jännitysten vuoksi huokosvesi jäätyy yleensä hieman puhtaan veden jäätymispisteen $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alapuolella. Veden jäätyminen rajoittuu ohuelle vyöhykkeelle $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -isotermin kylmälle puolelle, joten routarajalla voidaan asettaa lämpötasapainoa kuvaava yhtälö 1 /Miller 1972, Saarelainen 1990, 1992/.

$$q_- = q_+ + q_f + q_s \quad (1)$$

q_-	on	jäätyneen kerroksen läpäisevä lämpövuoto
q_+		sulasta maasta routarajalle tuleva lämpövuoto
q_f		huokosveden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto
q_s		routarajalle imeytyneen veden jäätymisessä vapautuva lämpövuoto

Konrad ja Morgenstern /1980, 1981, 1982/ ovat esittäneet ns. segregatiopotentiali-konseptin routanousun laskemiseksi. Segregatiopotentialia voidaan käyttää myös arvioitaessa maalajin routivuuden voimakkuutta /ISSMFE 1989/. Segregatiopotentialilla (SP) tarkoitetaan osittain jäätyneessä kerroksessa veden virtausnopeuden ja osittain jäätyneen maakerroksen lämpötilagradientin suhdetta.

Segregatiopotentialia voidaan määrittää laboratoriossa routanousukokeella tai in situ mittauksin. Segregatiopotentialia riippuu mm. maalajista, maan huokoisuudesta, jäälinsin virtaavan veden määrästä eli imujakaumasta routarajalla, vedenläpäisevyydestä, kapillaarisuudesta ja lämpötilagradientista sekä vallitsevasta jännitystilasta. Kaaviokuvassa 1 on esitetty jäätymismekanismi. Jäälinsin muodostuu osittain jäätyneen kerroksen d (ns. frozen fringe) yläpuolelle. Osittain jäätyneen kerroksen paksuus d on noin 2...4 mm. Veden virtaus on vaimenevaa osittain jäätyneen kerroksen läpi alimpaan jäälinsin.



Kuva 1. Kaaviokuva jäätymismekanismista /Konrad 1990/.

2.2 Sulamispehmenemisen mekanismi

Sulamisvaiheessa jäätynyt vesi vapautuu, jolloin maan vesipitoisuus on korkea ja maa on löyhtynyt routimisen vaikutuksesta. Huokospaine kuormituksen vaikutuksesta kasvaa ja maan jäykkyys pienenee. Kehittyvään huokospaineeseen vaikuttavat mm. maan vesipitoisuus ja oma paino sekä vedenläpäisevyys. Paikallisia olosuhdetekijöitä ovat mm. talven pakkasmäärä, jäätymis- ja sulamisnopeus, kuivatusolosuhteet sekä pohjavedenpinnan korkeus.

Ääritilanteessa vedellä kyllästetyn pohjamaan pinta nesteytyy liikennekuormituksen vaikutuksesta. Nesteytymisherkkyyteen vaikuttavat maakerroksen rakeisuus, vedenläpäisevyys ja tiiviys. Ajanjakso, jolloin tierakenteen kantavuus on alhaisimmillaan ajoittuu useimmiten kevääseen ja on kestoltaan vaihtelevan pituinen (muutamasta päivästä muutamaan viikkoon).

Vedellä kyllästetyssä maassa välittömästi kuormituksen lisäämisen jälkeen tehokas jännitys (raepaine) ei kasva, vaan huokospaine kasvaa kuormituslisäyksen verran. Kehittynyt huokospaine (u) pienentää maarakenteiden välistä tehokasta jännitystä ja samalla vähentää maan jäykkyyttä. Huokospaine muodostuu maan oman painon ($\bar{B} \cdot \gamma z$) ja liikennekuormituksen ($\bar{B} \cdot \Delta \sigma$) aiheuttamasta jännityksestä. Täysin vedellä kyllästetyssä maassa huokospaineparametri \bar{B} saa arvon 1, mutta osittain vedellä kyllästetyssä maassa arvo on pienempi kuin 1. Parametrin \bar{B} suuruuteen vaikuttaa vesipitoisuuden lisäksi maan konsolidaatiotila, jännitystila, tiiviys ja sensitiivisyys. Sulavan maan käyttäytymistä on havainnollistettu kuvassa 2.

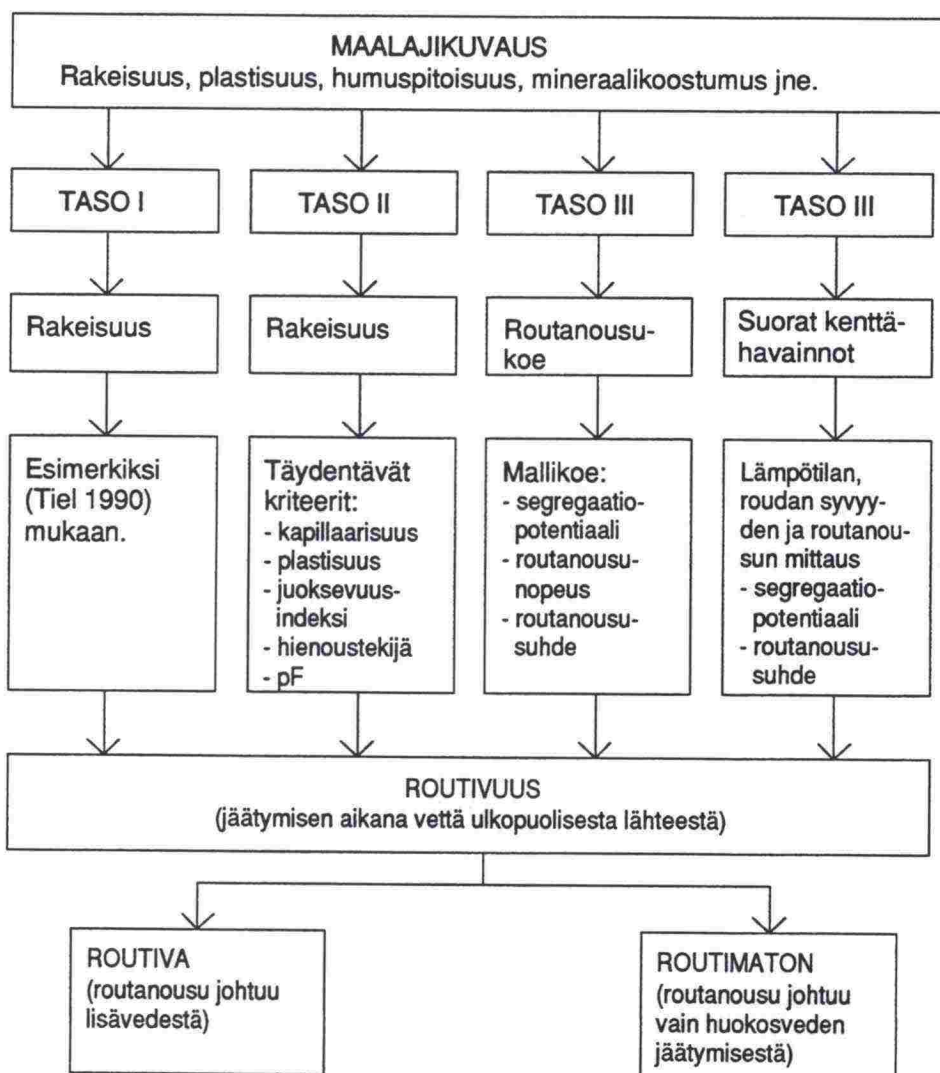
Tien rakennekerrokset pyrkivät myös löyhtymään leikkausmuodonmuutosten vaikutuksesta, jolloin niiden jäykkyys ja kuormitusta jakava vaikutus pienenee ja pohjamaan kuormitus kasvaa varsinkin tien reuna-alueilla. Päällisrakennemateriaali pyrkii myös sekoittumaan pehmenneeseen pohjamaan, jolloin tien vaurioitumisherkkyys edelleen kasvaa.

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

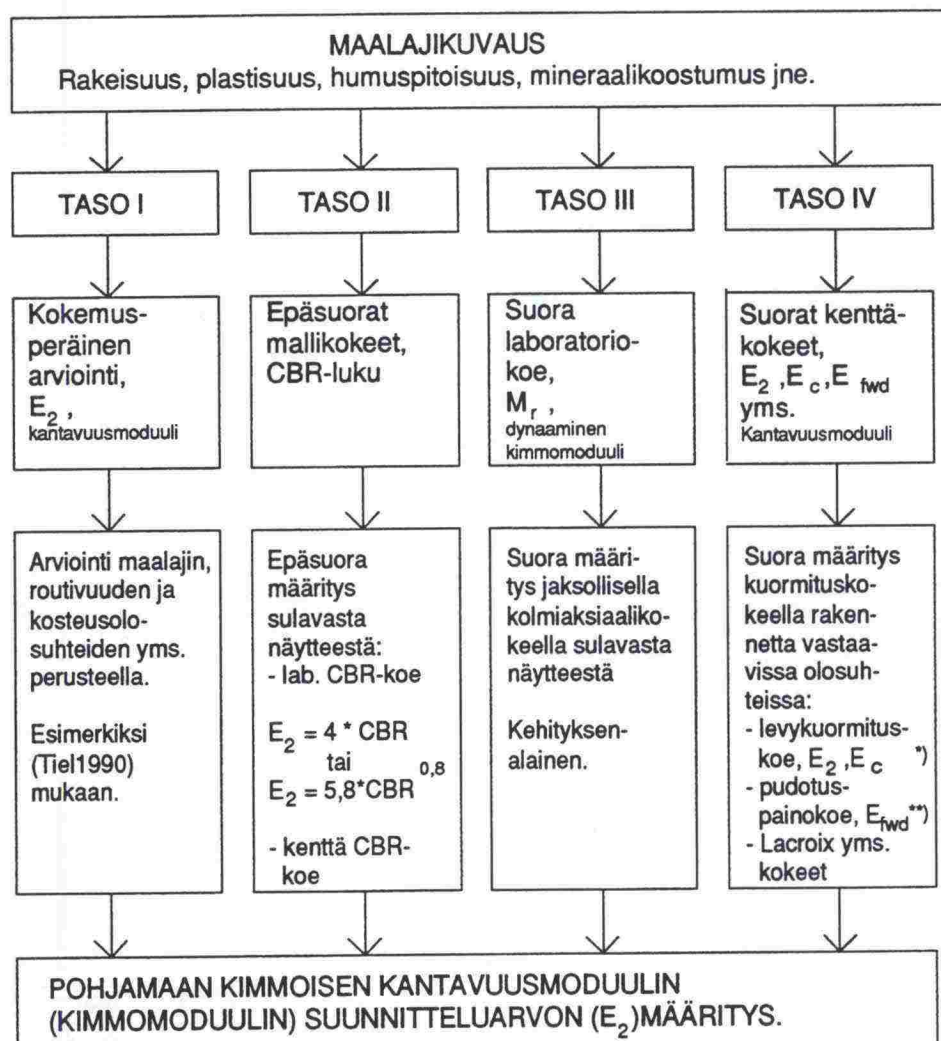
3.1 Yleisperiaatteet

Maalajin routivuutta, sulamispehmenemistä ja sulamispainumaa voidaan arvoida eritasoisin menetelmin. Jos näitä ominaisuuksia arvioidaan luokitusominaisuuksien, standardisoitujen mallikokeiden tai epäsuorien menetelmien avulla, voidaan ominaisuuksia verrata tulosten perusteella keskenään. Suunnittelutehtäviä silmälläpitäen maalajin ominaisuuksia tulisi pyrkiä arvioimaan in situ ominaisuutena, jolloin tulisi ottaa huomioon todelliset luonnon olosuhteet kuten pakkasmäärä, jännitystila, pohjaolosuhteet jne.

Maan routivuuden arviointiin käytettävät menetelmät on esitetty kuvassa 3 /ISSMFE 1989/ ja kevätkantavuuden määrittämiseen soveltuvat menetelmät on esitetty kuvassa 4 /ISSMFE 1993/. Routivuuden arviointiin käytettävät menetelmät esitetään porrastettaviksi kolmeen tasoon ja kevätkantavuuden arviointiin käytettävät menetelmät neljään tasoon.



Kuva 3. Kaavio maalajien routivuuskriteerien käytöstä ISSMFE:n /1989/ mukaan.



*) Sulan maan aikana mitattu kantavuusmoduuli kerrotaan kevät kantavuuskertoimella (kkk).

**) Pudotuspainolaitteen käyttö kevät kantavuuden määrittämiseen edellyttää vielä kehitystyötä.

Kuva 4. Kaavio maalajien kevät kantavuuden määrittämiseen soveltuvista menetelmistä /ISSMFE 1993/.

3.2 Menetelmien käyttö

3.2.1 Luokitus- ja hydrauliset ominaisuudet

Maalajin routivuutta voidaan arvioida pelkästään rakeisuuden perusteella (taso I) silloin, kun kyseessä ovat routimista jossakin määrin sietävät rakennuskohteet tai suuret maamassat, joiden routivuus pitää pystyä arvioimaan. Rakeisuuden perusteella ei pystytä arvioimaan routivuuden voimakkuutta.

Rajatapauksissa sekä vaativampien rakenteiden yhteydessä maalajin routivuuden arviontia tulee tarkentaa rakeisuuteen perustuvien kriteerien lisäksi muilla luokitusominaisuuksilla ja hydraulisiin ominaisuuksiin (vedenläpäisevyys ja kapillaarinen nousukorkeus) perustuvilla kriteereillä (taso II) tai muilla vaativammilla menetelmillä.

Alusrakenteen kantavuusmoduulin ohjearvo määritetään suomalaisessa käytännössä maalajin ja rakeisuuskäyrän avulla määritetyn routivuuden sekä paikallisten olosuhteiden avulla (taso I). Tielaitoksen soveltamassa kantavuusmitoitusmenetelmässä /Tiel 1990/ alusrakenne on jaettu seitsemään kantavuusluokkaan staattisella levykuormituskokeella määritettyjen kevät-kantavuusarvojen perusteella. Usein kantavuusluokka määritetään rakeisuuskäyrän perusteella ja kevätkantavuudeksi valitaan taulukon perusarvo eikä sulkuihin merkittyä vaihtelualuetta oteta huomioon.

Kevätkantavuuden kokemusperäinen arviointi /Tiel 1990/ maalajin rakeisuuskäyrään, routivuuteen ja paikallisiin kosteusolosuhteisiin perustuen tielaitoksen menetelmällä antaa levykuormituskoeita vastaavia tuloksia kohtuullisella tarkkuudella. Menetelmä on yleistävä, yksinkertainen ja sopii kohteisiin, joissa ei ole mahdollista tai tarpeen tehdä tarkempia tutkimuksia /Palolahti et al. 1993/.

3.2.2 Epäsuora laboratorikoe

CBR (Californian Bearing Ratio)-kokeen tuloksena saadaan ns. CBR-luku, joka ilmaisee prosentteina, kuinka suuri paine aiheuttaa tutkittavassa materiaalissa yhtä suuren painuman kuin standardimateriaalissa /SNV 670 320a/. CBR-koe voidaan tehdä myös kentällä /SNV 670316, Arm 1991/. Kuvassa 5 on esitetty laboratorio ja kenttä CBR-koelaitteisto.

Laboratorio CBR-koe tehdään puristamalla näytettä 50 mm männällä vakionopeudella 1.25 mm/min ja havaitsemalla painumia 0.63, 1.25, 1.88, 2.5, 3.75, 5.0, 6.25, 7.5, 10.0, 12.5 mm vastaavat kuormat. Havainnoista piirretään kuvaaja, jota verrataan standardimateriaalin kuvaajaan. CBR-arvo voidaan lukea suoraan kuvaajalta tai laskea kaavalla 2. Kuormitukset havaitaan 2.5 ja 5.0 mm kohdalta, jolloin saadaan CBR_{2.5} ja CBR_{5.0} arvot. Saaduista arvoista ilmoitetaan usein vain suurempi kokeen tulokseksi.

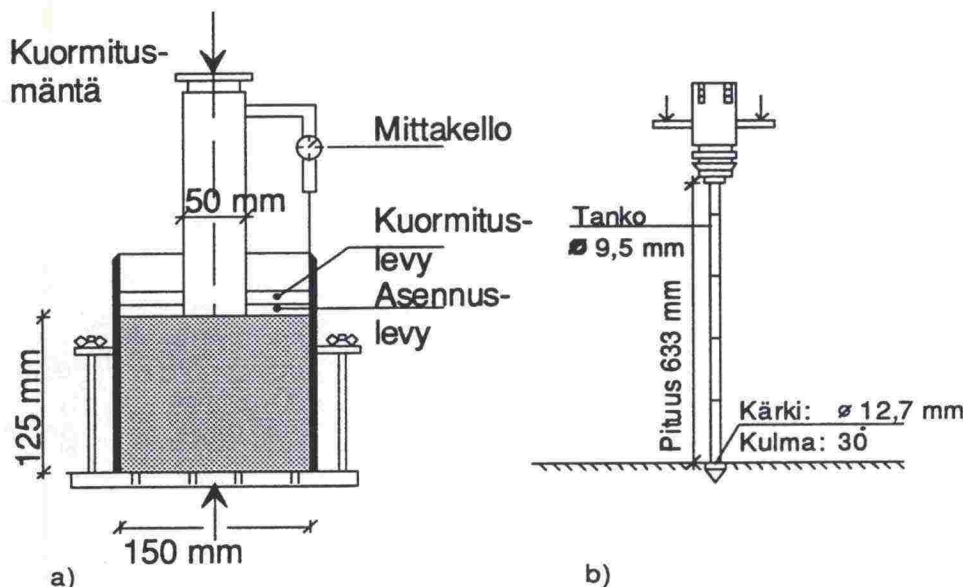
$$CBR = \frac{p}{p_s} \cdot 100\% \quad (2)$$

p on näytteen kuormitus, MPa
 p_s standardimateriaalin samaa painumaa vastaava kuormitus, MPa.

CBR-luvun avulla voidaan arvioida kevätkantavuusmoduuli eri kaavoilla. Eri tutkijat ovat saaneet toisistaan poikkeavia arviointikaavoja riippuen tutkittavan materiaalin maalajista, näytteen tilasta ja koejärjestelystä sekä siitä, onko CBR-lukua verrattu staattiseen (E_2) vai dynaamiseen (M_r) kantavuusmoduuliin.

Maalajin routivuus voidaan myös arvioida jäädytys-sulatuskokeen jälkeen määritetyn CBR-luvun perusteella /Jessberger 1987, Chamberlain 1987/. Kummassakin tutkimuksessa päädyttiin raja-arvona routivan ja routimattoman materiaalin välillä CBR-lukuun 20 %. Jessbergin /1987/ mukaan routimattomien maalajien CBR-luku oli yli 20, lievästi routivien 4...20 ja erittäin

routivien alle 4. Chamberlainin /1987/ ehdottamassa routivuusluokittelussa jaottelu oli hieman tiheämpi (6 luokkaa).



Kuva 5. a/ Laboratorio CBR-laitteisto, b/ kenttä CBR.

Sveitsiläinen kenttä CBR-koe soveltuu pehmeiden pohjamaiden kantavuuden määrittämiseen. Kokeen luonteesta ja laitteen kevyestä rakenteesta johtuen sillä voidaan mitata pohjamaan CBR-lukuja välillä 0...15 % 0,6 m syvyyteen saakka. Kokeessa CBR-laitetta painetaan vakionopeudella (25mm/s) maahan ja CBR-luvut havaitaan eri syvyytasoilta, tavallisimmin tasavälein, 4...8 kertaa. Koe tehdään kohteessa 4...5 kertaa neliömetrin alueella. Tietyn syvyytason (0...0,6 m) CBR-luku lasketaan mittausten keskiarvona ja mitoittavaksi CBR-luvuksi valitaan keskiarvoista alhaisin /SNV 670316/.

3.2.3 Routanousukoe

Routanousukokeet tehdään tavallisimmin ns. vakiolämpötilakokeina sulista häiriintymättömistä näytteistä jäädyttämällä. Aluksi näyte jäädytetään pakaskaapissa noin vuorokauden ajan. Tämän jälkeen näyte sulatetaan lämpöeristetyssä routasellissä pintakuormituksen 20 kPa alaisena, mikä vastaa likimäärin kohteissa vallitsevaa staattista jännitystä pohjamaan pinnalla. Sulattamisen jälkeen näyte kyllästetään liittämällä ulkopuolinen vesilähde näytteen pohjan yhteyteen läpäisevän huokoskiven ja -paperin välityksellä. Ulkopuolisen vesilähteen vedenpinta pidetään näytteen yläpinnan tasolla näytettä kylläستettäessä /Saarelainen 1992/.

Routanousukoetta ei ole standardisoitu, joten koejärjestelyissä on eroja. Tässä tutkimuksessa routanousukokeet tehtiin VTT:n tie-, geo-, ja liikennetekniikan laboratoriossa. Näytteen ollessa täysin kyllästynyt ja tasalämpöinen aloitettiin routanousukoe. Näytteen yläpintaan kohdistettiin -3 °C lämpötila ja alapinta pidettiin sulana lämpötilassa +1 °C kierrättämällä jäähdystynestettä lämmönvaihtimissa lämpötilagradientin ja routimisen edellyttämän veden saannin ylläpitämiseksi /Saarelainen 1992, Kujala 1991/. Läm-

pötilaa mitattiin 5 lämpötila-anturilla näytteen kyljestä sivupinnalta sekä näytteen ylä- ja alapinnalta erikseen. Näytteen halkaisija oli 80 mm ja korkeus noin 100 mm.

Kokeen aikana mitattiin ja rekisteröitiin routanousu ja 0 °C isotermin asema sekä tuloksista laskettiin segregatiopotentiaali. Kokeen kesto oli vähintään 24 tuntia ja jäädytys lopetettiin, kun routarajan eteneminen pysähtyi useiden tuntien ajaksi.

3.2.4 Kenttäkokeet

Roudan syvyys mitataan routaputken avulla (Gandahlin putki). Routaputki koostuu kahdesta sisäkkäisestä muoviputkesta /Friberg & Slunga 1989/. Sisempi muoviputki täytetään metyleenisiniliuoksella, joka menettää värinsä alle 0 °C lämpötilassa. Routakerroksen sijainti saadaan selville nostamalla sisempi putki maasta ja mittaamalla läpinäkyvän liuoksen osan asema putkessa.

Routanousu saadaan vaaitsemalla tien pinnan ja/tai routaputken pään korkeusaseman muutos tunnettuun kiintopisteeseen nähden.

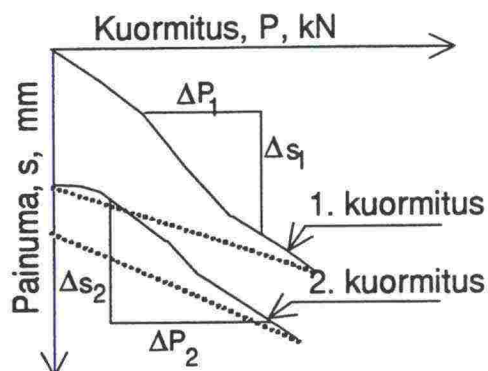
Pohjavedenpinnan korkeusasema mitataan maahan lyödystä teräsputkesta, joka puhdistetaan riittävän syvälle lyöntivaiheessa putkeen tunkeutuneesta maa-aineksesta. Mittaus tehdään määrittämällä jäykällä mitalla tai sähköisellä mittausluodilla pohjavedenpinnan korkeusasema maanpintaan verrattuna.

Levykuormituskokeen tuloksena saadaan staattinen kantavuusmoduuli E_1 , E_2 tai E_c johtuen kuormituksen hitaasta luonteesta.

Kuormitusmenetelmänä on käytetty joko tielaitoksen soveltamaa levykuormituskoetta /Tiel 1990/ tai jaksollista STINA-kuormituskoetta /STINA 1977, Jämsä 1985/.

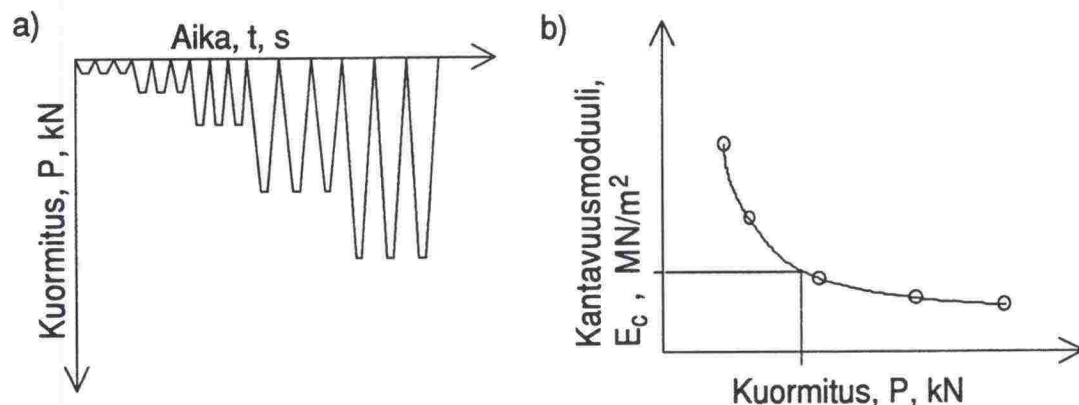
Levykuormituskokeessa kuormitusta nostetaan portaittain, painumat kullakin portaalla rekisteröidään ja kuormitus puretaan, kun painuma on ylittänyt 1...1,5 mm:ä (kuva 6). Kokonaispainuman rajoituksen tarkoituksena on estää kokeen tekijää kuormittamasta maapohjaa murtoon saakka ja toisaalta rajoittaa painumat kimmoisalle alueelle. Painumisnopeuden tulisi lukemaa luettaessa olla alle 0.1 mm/min. Tämän jälkeen kuormitus nostetaan uudelleen portaittain ja painumat rekisteröidään. Ensimmäisen kuormituksen perusteella määritetään ns. E_1 - arvo ja toistokuormituksen perusteella E_2 - arvo. Puhuttaessa tien kantavuudesta tarkoitetaan aina E_2 - arvoa.

STINA- kuormituskokeessa kuormitusta nostetaan portaittain ja kutakin portasta toistetaan kolme kertaa ennen seuraavaan kuormitustasoon siirtymistä (kuva 7a). Toistojen välillä kuormitus puretaan ja painuman annetaan palautua. Kuormituksen yhteydessä rekisteröidään levyn kokonaispainuma kuormituksen alaisena ja palautuma kuorman poistamisen jälkeen. Kantavuusmoduuli, E_c , lasketaan kullekin kuormitustasolle pohjamaan kokonaispainuman perusteella /STINA 1977, Jämsä 1985/.



Kuva 6. Levykuormituskokeen tulostus.

STINA-kokeessa tuloksista piirretään kutakin kuormitustasoa vastaava kantavuusmoduuli kuormituksen suhteen. Kunkin portaan kantavuusmoduuli on portaan kolmen arvon keskiarvo. Näin saadulta kuvaajalta määritetään pohjamaan pinnalla vallitsevaa kuormitustasoa vastaava lopullinen pohjamaan kantavuusmoduuli E_c (kuva 7b). Pohjamaan pinnalla vallitseva kuormitus on laskettava tai arvioitava jokaisessa kohteessa erikseen.



Kuva 7. a/ STINA-levykuormituskoe, b/ kuormitus-kantavuusmoduulikuvaa-ja.

Pudotuspainolaitteella mitataan tien pinnan taipumia nopean dynaamisen kuormituksen alaisena. Tierakenteeseen kohdistuva kuormitus saadaan aikaan painolla, joka pudotetaan halutulta korkeudelta kuormituslevyn päälle /Tholen 1980, Liimatta 1989/.

Kuormituksen aiheuttamat taipumat mitataan kiihtyvyyssantureilla tai seismometreillä kuormituslevyn keskipisteen kohdalta sekä halutulta etäisyydeltä levyn ulkopuolelta. Tulosten perusteella saadaan tien pinnan taipumasuppi-
lo (tien pinnan taipuma).

Pudotuspainolaitteen tulosten käsittely on käytännössä hoidettu tietokoneen avulla. Tietokoneohjelmat toimivat ns. takaisinlaskentaohjelmina. Alkutietoina syötetään rakennekerrosten paksuudet ja E - moduuleille oletusarvot, joiden avulla ohjelma laskee teoriaa soveltaen taipumasuppilon

muodon. Tämän jälkeen laskettuja arvoja verrataan mitattuihin taipumasuppilon arvoihin. Mikäli poikkeamat ovat sovittuja suuremmat, niin E- moduulien arvoja muutetaan ja ohjelma laskee uudet ekvivalenttiset kerros-paksuudet ja taipumasuppilon. Laskenta lopetetaan, kun laskettu taipumasuppilo yhtyy mitattuun riittävällä tarkkuudella. Pudotuspainolaitteen takaisinlaskentaohjelmalla arvioitua pohjamaan kantavuusmoduulia merkitään symbolilla E_{fwd} .

4 TUTKIMUSAINEISTO

4.1 AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET

Vuonna 1974 aloitetussa yhteispohjoismaisessa STINA-projektissa /1977/ tutkittiin tien rakennekerrosten alla olevan pohjamaan kantavuusmoduulin vaihtelua vuodenajan mukaan. Suomessa kohteina olivat Vihdin ja Otaniemen tutkimuskohteet. Kantavuutta mitattiin STINA-levykuormituskokeella, jossa kuormitusta nostetaan viidessä portaassa toistamalla kutakin porrasta kolme kertaa. Kuormituksen jälkeen kuorma poistetaan ja painuman annetaan palautua. Kantavuusmoduuli E_c laskettiin kokonaispainuman perusteella, kullekin kuormitusportaalalle.

"Pohjamaan kantavuus tierakenteen alla" -projektissa /Jämsä 1985/ tutkittiin vuosina 1976-1984 eri pohjamaalajien kantavuusmoduulien vuodenaikaisvaihteluja tierakenteen alla. Tielaitoksen rahoittamassa tutkimuksessa on jatkettu STINA-levykuormituskokeiden /STINA 1977/ periaatetta.

Friberg et al. /1989/ tutki "Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen" -projektissa uusimpien routivuuskriteerien soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin. Laboratorio- ja kenttätutkimuksia tehtiin viidellä eri paikkakunnalla: Jämsässä, Myrskylässä, Mäntyharjulla, Pippolassa ja Urjalassa. Tutkimus tehtiin yhteistyössä TKK:n pohjarakennuksen ja maamekaniikan laboratorion, VTT:n geotekniikan laboratorion sekä tie- ja liikenne laboratorion, Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laboratorion ja Oulun yliopiston geoteknillisen laboratorion kesken.

Kujala /1991/ tutki Oulun yliopistossa tekijöitä, jotka vaikuttavat routimisherkyyteen ja routanousupaineeseen. Maanäytteet (68 kpl) käsittivät kaikki maalajit savesta hiekkaan sekä eri moreenityypit (liite 9).

Saarelainen /1992/ on tutkinut routanousua ja routasyvyyttä kenttä- ja laboratorio-olosuhteissa. Kenttätutkimuksia tehtiin kuudessa eri kohteessa, Alajärvellä, Piippolassa ja Joensuussa.

"Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus" -projektissa /Palolahti et al. 1993/ määritettiin pohjamaiden luokitusominaisuudet, lämpötekniset ja hydrauliset ominaisuudet, vedenpidätyskyky sekä huokosjakaumat. Lisäksi tehtiin CBR-kokeita ja jaksollisia kolmiakselialikokeita. Tutkimuskohteissa havaittiin myös roudan syvyyttä, routanousua, sulamissyvyyttä ja pohjavedenpinnan korkeutta kahtena havaintokeväänä 1991 ja 1992. Kantavuus- ja huokospainemittauksia tehtiin vertailuarvon saamiseksi viikon välein sulamisvaiheessa sekä syksyisin.

Kantavuusmittauksia tehtiin pudotuspainolaitteella ja levykuormituslaitteella. Tutkimuksia tehtiin viidessä eri kohteessa, Nummi-Pusulassa, Kontulassa, Jyväskylässä, Oulunsuussa ja Kempele- Oulunsalossa.

4.2 TÄYDENTÄVÄT TUTKIMUKSET

4.2.1 STINA-PROJEKTIN TUTKIMUSKOHTEET

STINA-projektin /1977/ tutkimuskohteista valittiin kaksi kohdetta lisätutkimuksia varten.

Kantatie 53:lta haettiin 2.8.1993 näytteitä osuudelta Palojärvi-Olkkala pl 114+80. Näytteenottopaikka sijaitsee kyseisen tien oikealla puolella Vihtiin päin mentäessä. Näytteenottokuoppa kaivettiin ojan luiskaan noin 4 metriä tien reunasta. Kuopan pohjan syvyys oli 0.7 metriä nykyisestä tienpinnasta.

Otaniemessä, VTT:n tie-,geo-, ja liikennetekniikanlaboratorion pysäköintipaikan läheisyydessä sijaitsevan kohteen maanäytteet haettiin 22.9.1993. Näytteenottokuoppa kaivettiin nykyisestä maanpinnasta 0.6 metrin syvyyteen.

Ensinmainitusta kohteesta haettiin luonnontilaisia näytteitä CBR- ja routanousukoetta varten. Otaniemen hiekkamoreenista ei saatu luonnontilaisia näytteitä, joten CBR-kokeen ja routanousukokeen näytekappale jouduttiin rakentamaan häiriintyneestä näytteestä. Lisäksi molemmista kohteista otettiin häiriintynyt näyte luokituskokeita varten.

4.2.2 POHJAMAAN KANTAVUUS -PROJEKTIN TUTKIMUSKOHTEET

Pohjamaan kantavuus -projektin /Jämsä 1985/ tutkimuskohteista valittiin myöskin kaksi kohdetta, joista haettiin materiaalia lisätutkimuksia varten.

Ensimmäinen kohde sijaitsi Palojärvi-Olkkala tiellä, paalulla 100+17. Näytekuoppa kaivettiin 2.8.1993 tien oikealle puolelle, tien reunasta noin 3 metrin päähän. Kuopan pohja ulotettiin 0.9 metrin syvyyteen nykyisestä tienpinnasta.

Toisen kohteen paaluluku oli 100+40 samalla tiellä. Näytteet haettiin 17.8.1993 noin 3 metrin etäisyydeltä tien oikeasta reunasta. Näytteenotosyvyys oli 0.8 metriä nykyisestä tienpinnasta.

Molemmista kohteista otettiin luonnontilaiset näytteet CBR-kokeita ja routanousukokeita varten sekä häiriintyneet näytteet luokituskokeita varten.

4.2.3 KEVÄTKANTAVUUSPROJEKTIN KOHTEET

Kevätkantavuusprojektin /Palolahti et al. 1993/ kohteista Kontula ja Nummi-Pusula valittiin lisätutkimuskohteiksi. Kontulasta haettiin näytteitä 4.6.1993. Kohde sijaitsee Untamalantien päässä sijaitsevalla koepenkereellä. Näytteenottosyvyys oli 0.75 metriä nykyisestä maanpinnasta.

Nummi-Pusulasta haettiin näytteet 28.6.1993. Näytteenottopaikka sijaitsee maantie 280:llä, Hyönölän taajamasta noin 2 kilometriä Somerolle päin. Näytteet otettiin kuopasta, joka oli tien oikealla puolella Somerolle mentäessä noin 2 metriä tien reunasta ja syvyydeltään 1.0-1.2 metriä.

Näytteitä otettiin luonnontilaisena CBR-koetta varten ja häiriintyneenä luokitusominaisuuksien määrittystä varten.

5 KEVÄTKANTAVUUDEN MÄÄRITYS

5.1 AIKAISEMMAT TUTKIMUKSET

Sulamispehmeneminen ja kevätkantavuus projektin /Palolahti et al. 1993/ yhteydessä tehdyt levykuormituskokeiden tulokset ovat taulukossa 6. Taulukossa 1 ovat Ilmatieteen laitoksen kuukausikatsauksista ja pikatilastoista saadut ilman keskilämpötilat eri kohteissa. Taulukossa 2 ovat samoista ilmastotiedoista vuorokausikeskilämpötilojen perusteella lasketut vuosien 1990-91 ja 1991-92 talvien pakkasmäärät ja Mäkelän et al. /1979/ esittämät, tilastollisesti kerran kahdessa ja kerran kymmenessä vuodessa toistuvat pakkasmäärät. Taulukossa 3 on esitetty saman tutkimuksen aikana tehdyt CBR-kokeen tulokset vesiupotuksessa säilytetylle ja sulavalle näytteelle. Määritetyt segregaatipotentiaalit ovat taulukossa 12, mitatut roudan syvyydet taulukossa 11 ja routanousut taulukossa 14 /Palolahti et al. 1993/.

STINA /1977/ tutkimuksen yhteydessä saadut CBR-kokeen tulokset on esitetty taulukossa 3. STINA-projektin /1977/ ja Jämsän /1985/ tutkimusten levykuormituskokeiden tuloksia on taulukossa 6.

Taulukko 1. Säähavaintoasemat ja ilman vuotuiset keskilämpötilat.

Tutkimus- paikkakunta	Säähavainto- asema	Ilman keskilämpötila, °C			
		1990	1991	1931-60	1961-90
Kontula	Helsinki, Vantaa	6.1	5.6	4.4	4.5
Nummi-Pusula	Vihti, Maasoja	5.7	5.0	4.1	3.9
Jyväskylä	Jyväskylä, lentoasema	3.9	3.6	2.8	2.6
Oulu	Oulu, lentoasema	3.5	3.0	2.3	2.0

Taulukko 2. Tutkimuskohteiden pakkasmäärät talvikausina 1990-91 ja 1991-92 sekä eri todennäköisyydellä toistuvat pakkasmäärät F_2 ja F_{10} /Palolahti et al. 1993/.

Tutkimus- paikkakunta	Pakkasmäärä F, Kh		Vuoden pakkasmäärä /Mäkelä et al. 1979/ F_2 F_{10}	
	1990-91	1991-92		
Kontula	10 320	5 030	11 300	23000
Nummi-Pusula	11 897	5 880	11 300	23 000
Jyväskylä	19 728	11 172	19 800	33 000
Oulu	24 960	13 188	24 600	38 600

Taulukko 3. CBR-kokeen tulokset /Palolahti et al. 1993/ ja /STINA 1977/.

Tutkimuskohde	Maalaji	CBR, vesi-upotus %	CBR, sulava %	CBR, luonnon- tilainen %
Nummi-Pusula	saSi	4.0	2.0	
Kontula	liSa	1.2	0.4	
Jyväskylä	saSi	2.9	2.7	
Oulunsuu	hkSi	0.13	0.13	
Kempele- Oulunsalo	laSa	8.5	0.32	
Vihti	laSa			3.3 ja 5.4
Otaniemi	HkMr			16

5.2 TÄYDENTÄVÄT TUTKIMUKSET

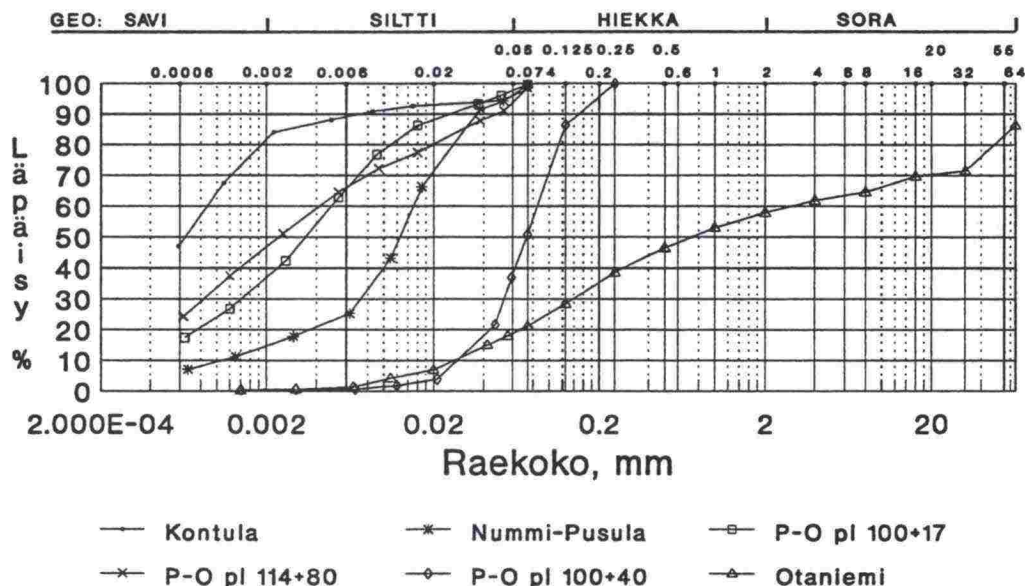
5.2.1 KONTULA

Tutkittu materiaali oli lihavaa savea (kuva 8), jonka savipitoisuus oli 81.5 % ja hienoainespitoisuus 98.2 %. Kiintotiheys oli 2.78 t/m³ ja kuivairtitiheys 0.76 t/m³ luonnontilaisen vesipitoisuuden ollessa 99.4 %. Saven humuspitoisuus oli 0.55 %. Huokoisuus oli 73 % sekä kyllästysaste 100 %.

Saven juoksuraja oli 82.8 %. Savi oli erittäin plastista plastisuusluvun ollessa 52.3 %. Kartiokokeella saatiin häiritylle näytteelle hienousluku 84.2 %.

Tehdyt CBR- kokeen tulokset ja vesipitoisuudet kokeen lopussa on esitetty taulukossa 4. Sama yhteys on esitetty kuvaajana liitteessä 2.

Liitteessä 10 on vertailtu tässä tutkimuksessa saatua CBR-luvun ja vesipitoisuuden välistä vuorosuhdetta Arm'in /1991/ laboratoriossa ja kentällä saamiin tuloksiin (vrt. liite 5).



Kuva 8. Tutkimuskohteiden rakeisuuskäyrät (P-O = Palojärvi-Olkkala).

Taulukko 4. CBR- kokeiden tulokset ja vesipitoisuudet
(P-O = Palojärvi-Olkkala tie).

a) Luonnontilaiset näytteet.

Kontula liSa		Nummi- Pusula saSi		P-O pl 100+17 laSa		P-O pl 114+80 laSa		P-O pl 100+40 siHk		Otaniemi HkMr	
CBR	w	CBR	w	CBR	w	CBR	w	CBR	w	CBR	w
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
1.1	89	3.3	29	23	20	3.4	36	32	23	10	10
1.0	98	3.2	29			4.1	33	23	23	8.8	10
1.0	94					4.2	30	23	22		
1.1	98										
0.8	77										

b) Vesiupotuksessa olleet näytteet

0.7	101	1.9	30	2.3	30	4.3	35	19	23	5.2	15
0.8	98	2.3	30	3.8	27	3.9	34	23	24	5.1	16
		2.8	29	2.7	26	4.5	31	18	24		

5.2.2 Nummi-Pusula

Maa-aines oli savista silttiä (kuva 8), jonka savipitoisuus oli 15% ja hienoainespitoisuus 99.6 %. Siltin kiintotiheys oli 2.68 t/m3, kuivairtotiheys 1.48 t/m3 ja luonnontilainen vesipitoisuus syvyydellä 1.0 metriä 28.0 % ja syvyydellä 1.2 metriä 31.1 %. Humuspitoisuus oli 0.83 %, huokoisuus 45.0 % ja kyllästysaste 92 %.

Syvyydellä 1.0 metriä siltti oli vähän plastista plastisuusluvun ollessa 4.5 % ja juoksurajan 29.5 %. Syvyydellä 1.2 metriä plastisuusluku oli 11.4 %. Kohtalaisesti plastisen siltin juoksuraja oli 33.4 %. Kartiokokeen hienousluvuksi häirityllä näytteellä saatiin syvyydellä 1.0 metriä 31.1 % ja syvyydellä 1.2 metriä 37.3 %.

CBR-kokeiden tulokset ja vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 4. Tästä vuorosuhteesta piirretty kuvaaja on esitetty liitteessä 2.

5.2.3 Palojärvi-Olkkala tie pl 100+17

Tutkittu materiaali oli laihaa kuivakuorisavea (kuva 8), jonka savipitoisuus oli 37 % ja hienoainespitoisuus 99.8 %. Kiintotiheys oli 2.73 t/m³ ja kuivairtitiheys 1.7 t/m³ luonnontilaisen vesipitoisuuden ollessa 23.8 %. Savessa ei ollut humusta. Huokoisuus oli 37.9 % sekä kyllästysaste 100 %.

Saven juoksuraja oli 36.9 %. Savi oli kohtalaisen plastista plastisuusluvun ollessa 13.6 %. Kartiokokeella saatiin häiritylle näytteelle hienousluku 39.5 %.

CBR-kokeiden tulokset ja vesipitoisuudet ovat taulukossa 4. Liitteessä 3 on kuvaaja samasta vuorosuhteesta.

5.2.4 Palojärvi-Olkkala tie pl 114+80

Maa-aines oli laihaa savea (kuva 8), jonka savipitoisuus oli 47 % ja hienoainespitoisuus 98.6 %. Saven kiintotiheys oli 2.73 t/m³, kuivairtitiheys 1.42 t/m³ ja luonnontilainen vesipitoisuus 33.2 %. Humuspitoisuus oli 1.34 %, huokoisuus 48.0 % ja kyllästysaste 98 %.

Savi oli erittäin plastista plastisuusluvun ollessa 30.9 %. Juoksuraja oli 58.5 %. Kartiokokeen hienousluvuksi häirityllä näytteellä saatiin 61.5 %.

CBR-kokeiden tulokset ovat taulukossa 4. CBR-kokeen ja vesipitoisuuden välinen vuorosuhde on esitetty liitteessä 3.

5.2.5 Palojärvi-Olkkala tie pl 100+40

Tutkimuspisteen materiaali oli hiekkaa (kuva 8), jonka savipitoisuus oli 0.6 % ja hienoainespitoisuus 50.9 %. Humusta hiekassa oli 0.5 %. Hiekan kuivairtitiheys oli 1.68 t/m³ luonnontilaisen vesipitoisuuden ollessa 21.5 %. Kiintotiheys oli 2.68 t/m³, huokoisuus 37.4 % ja kyllästysaste 97 %. Koska materiaali oli hiekkaa, ei siitä voitu määrittää plastisia ominaisuuksia. Kartiokokeella saatiin hiekalle hienousluvuksi 27.4 %.

CBR-kokeen tulokset ja vesipitoisuudet ovat taulukossa 4. Sama vuorosuhde on kuvaajana liitteessä 4.

5.2.6 Otaniemi

Otaniemestä haettu maanäyte oli hiekkamoreenia (kuva 8), jossa oli savea vain 0.4 % sekä hienoaainesta 7 %. Moreenissa oli humusta 0.5 % ja sen kuivairtotiheys oli 1.52 t/m³. Luonnontilainen vesipitoisuus oli 8.9 % ja kiintotiheys 2.68 t/m³. Moreenin huokoisuudeksi saatiin 43.1 % kyllästysasteen ollessa 31 %.

Saadut CBR-kokeen tulokset ja vesipitoisuudet on esitetty taulukossa 4. Liitteessä 4 on kuvaaja samasta vuorosuhteesta.

Koska materiaali oli hiekkamoreenia, ei siitä voitu määrittää plastisia ominaisuuksia.

5.3 Pohjamaan kantavuusmoduulin määrittäminen eri menetelmillä

5.3.1 Kokemusperäinen kantavuusmoduulin arviointi

Tielaitoksen /TVH 1985/ käytännön mukaan alusrakenteen kantavuus saadaan maalajin rakeisuuskäyrän, routivuuden ja kosteusolosuhteiden mukaan. Luokituksessa pohjamaan kantavuus jaetaan seitsemään kantavuusluokkaan A - G , joissa kantavuusmoduuli on vaihdellen 5 ...300 MN/m²:n. Pohjamaiden kantavuudet tämän käytännön perusteella arvioituna on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Pohjamaan kantavuus tutkimuskohteissa tielaitoksen /TVH 1985/ mukaan.

Tutkimuskohde	Maalaji	Kantavuus E_2 , MN/m ²
Kontula	liSa	5
Nummi-Pusula	saSi	10
P-O pl 100+17	laSa, kk	20
P-O pl 114+80	laSa	5
P-O pl 100+40	siHk	20
Otaniemi	HkMr	20
Jyväskylä	saSi	20
Oulunsuu	hkSi	20
Kempele-Oulunsalo	laSa	20

5.3.2 CBR-kokeen perusteella arvioitu kantavuusmoduuli

STINA-tutkimuksessa /1977/ havaittiin kaavan 3 mukainen vuorosuhde luonnontilaisilla sulilla näytteillä määritetyn CBR-luvun ja jaksollisen kolmi-aksiaalikokeen tulosten välillä. Vuorosuhde on esitetty myös kaavan 4 muodossa /Shell 1978/.

$$M_r = 10 * CBR \quad (3)$$

$$M_r = 17.6 * CBR^{0.64} \quad (4)$$

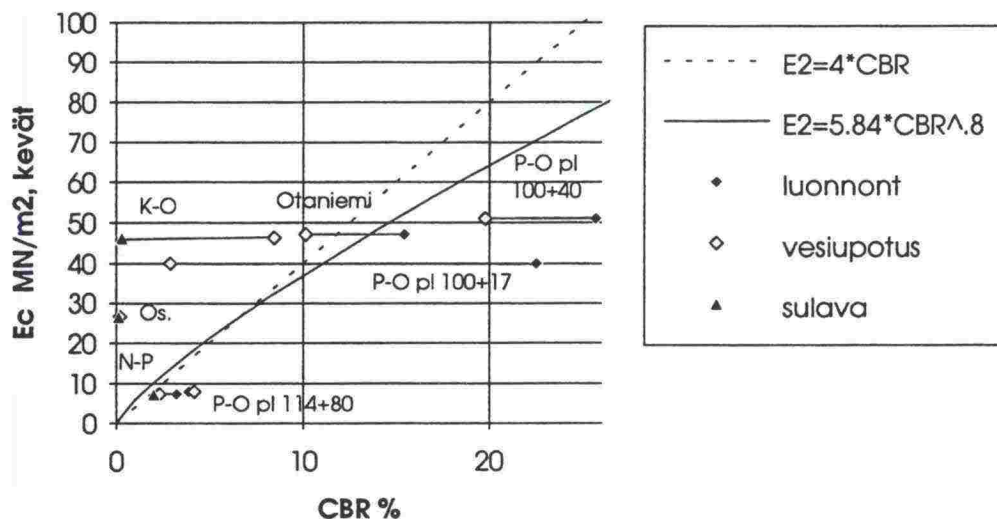
Orama /1993/ on saanut sulamisvaiheessa määritetyn CBR-luvun ja levykuormituskokeella saadun kantavuusmoduulin välille kaavan 5 mukaisen vuorosuhteen Jessbergerin /1974/ tulosten perusteella. Vuorosuhde voidaan esittää myös kaavan 6 mukaisesti /Orama 1993/.

$$E_2 = 5.84 * CBR^{0.80} \quad (5)$$

$$E_2 = 4 * CBR \quad (6)$$

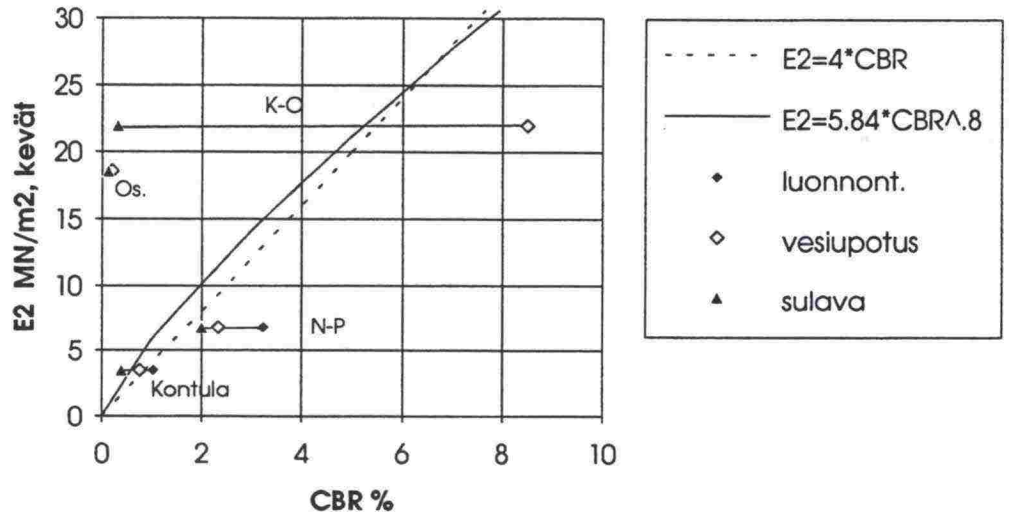
M_r on dynaaminen kimmomoduuli, MN/m^2
 CBR CBR-kokeen kantavuusarvo, %
 E_2 staattinen kantavuusmoduuli toistokuormituksesta, MN/m^2

Kuvassa 9 on esitetty sulan, vesiupotuksessa säilytetyn ja sulavan maan CBR-kokeiden sekä keväällä tehtyjen STINA-levykuormituskokeiden tulosten välinen vuorosuhde. Kuvaan on lisäksi piirretty kaavojen 5 ja 6 antama vuorosuhde sulavan maan CBR-kokeen ja levykuormituskokeen tulosten välillä. Vaikka hajonta on suurta, näyttäisi luonnontilaisen ja vesiupotuksessa olleen näytteen CBR- kokeen tuloksen keskiarvo asettuvan likimääräisesti kaavoja 5 ja 6 kuvaavan käyrän kohdalle. Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon kohteiden etenkin sulavan maan CBR-kokeen tulokset eroavat muista tuloksista huomattavasti.



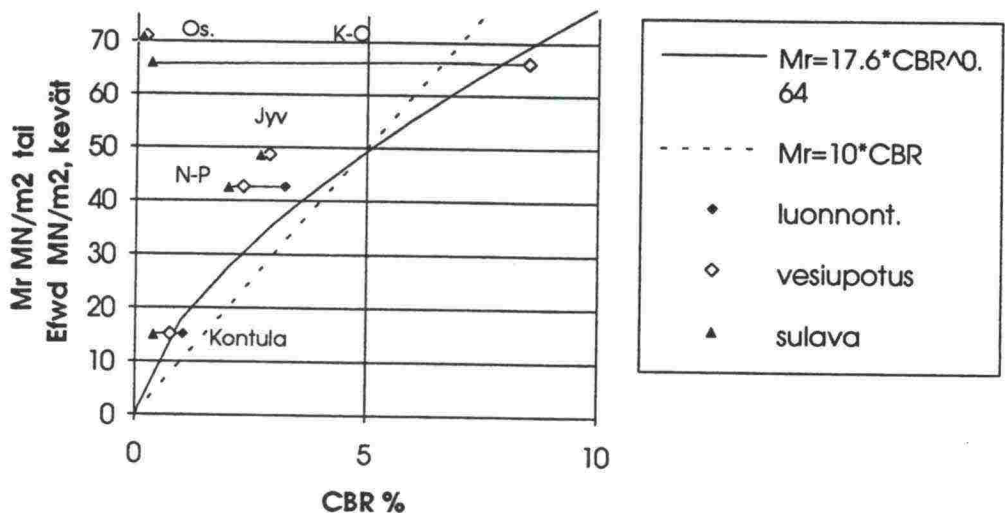
Kuva 9. Keväällä tehtyjen Stina-levykuormituskokeiden ja CBR-kokeiden tulosten vuorosuhde sekä kaavojen 5 ja 6 kuvaama vuorosuhde.

Kuvassa 10 on esitetty CBR-kokeiden ja keväällä tehtyjen levykuormituskokeiden tulosten välinen vuorosuhde. Kuvaan on lisäksi piirretty kaavojen 5 ja 6 antama vuorosuhde sulavan maan CBR-kokeen ja levykuormituskokeen tulosten välillä. Kuvan tuloksissa on samanlainen suuntaus kuin kuvan 9 tuloksissa.



Kuva 10. Keväällä tehtyjen levykuormituskokeiden ja CBR- kokeiden tulosten vuorosuhde sekä kaavojen 5 ja 6 kuvaama vuorosuhde.

Kuvassa 11 on esitetty CBR-kokeiden tulosten ja keväällä tehtyjen pudotuspainolaitteen tulosten välinen vuorosuhde. Kuvaan on lisäksi piirretty kaavojen 3 ja 4 antama vuorosuhde sulan maan CBR-kokeen ja jaksollisen kolmiakselialikokeen tulosten välillä. Pudotuspainolaitteen tuloksia verrataan dynaamiseen kimmomoduuliin, koska pudotuspainolaite on luonteeltaan dynaaminen koestuslaite. CBR- kokeen tulosten perusteella arvioidut moduuliarvot asettuvat hieman kaavojen 3 ja 4 kuvaajien yläpuolelle. Koetulosten ja kaavojen välinen yhteys on selvempi kuin kuvissa 9 ja 10.



Kuva 11. Keväällä tehtyjen pudotuspainokokeiden ja CBR-kokeiden tulosten vuorosuhde sekä kaavojen 3 ja 4 kuvaama vuorosuhde.

5.3.3 Moduulin määrittäminen levykuormituskokeilla

Tässä tutkimuksessa käsitellyistä yhdeksästä kohteesta kaksi kuuluu vuoden - 1977 STINA- kohteisiin. Kaksi kohdetta kuuluu vuoden 1985 Jämsän tutkimuskohteisiin ja loput viisi vuonna 1990 tehtyihin tutkimuksiin. Levykuormituskokeita on tehty sekä tielaitoksen käyttämällä menetelmällä (kuva 6) että STINA-menetelmällä (kuva 7). Lisäksi joissain kohteissa on tehty mittauksia pudotuspainolaitteella. Mittausten tulokset on esitetty taulukossa 6. STINA-kokeiden tulokset on luettu kuormitus-kantavuusmoduuli-kuvaajalta 40 kPa:n kohdalta. Pudotuspainolaitteella saadut tulokset on arvioitu tien pinnalta tehtyjen kokeiden tulosten perusteella ns. takaisinlaskentaohjelmia käyttäen. Kevään arvona on käytetty kevään alhaisinta ja sulan kauden (kesä) arvona loppukesän/alkusyksyn korkeinta kantavuuden arvoa. Kantavuusmittaukset on tehty tutkimusten STINA /1977/, Jämsä /1985/ ja Palolahti et al. /1993/ yhteydessä.

Taulukko 6. STINA-levykuormituskokeella (E_c) /STINA 1977, Jämsä 1985/, levykuormituskokeella (E_2) ja pudotuspainolaitteella (E_{fwd}) /Palolahti et al. 1993/ määritetyt pohjamaan kantavuusmoduulit.

Tutkimuskohde	E_c MN/m ²		E_2 MN/m ²		E_{fwd} MN/m ²	
	Kevät	Kesä	Kevät	Kesä	Kevät	Kesä
Kontula	-	-	3.5	6.5	15.1	16.9
Nummi-Pusula	7.3	15.9	6.8	21.7	42.7	58.2
P-O pl 100+17	40	55	-	-	-	-
P-O pl 114+80	8	17	-	-	-	-
P-O pl 100+40	51	75	-	-	-	-
Otaniemi	47.1	82.7	-	-	-	-
Jyväskylä	-	-	-	-	48.8	70
Oulunsuu	26.6	72	18.6	33.8	71	125
Kempele-Oulunsalo	46.4	54	22.0	25.1	66.1	121

5.4 Kevätkantavuuskerroin

5.4.1 Levykuormituskokeiden tulosten perusteella lasketut kevätkantavuuskertoimet

Mitattujen kantavuusmoduulien avulla voidaan laskea kevätkantavuuskerroin kaavalla 7. Tulokset on esitetty taulukossa 7.

$$kkk = \frac{E_{kevät}}{E_{kesä}} \quad (7)$$

kkk on kevätkantavuuskerroin
 $E_{kevät}$ keväällä määritetty kantavuus, MN/m²
 $E_{kesä}$ kesällä määritetty kantavuus, MN/m²

Taulukko 7. Kevätkantavuuskertoimet levykuormituskokeella ja pudotuspainolaitteella määritettynä.

Tutkimuskohde	kkk $E_{C,kevät}/E_{C,kesä}$	kkk $E_{2,kevät}/E_{2,kesä}$	kkk, $E_{fwd,kevät}/E_{fwd,kesä}$
Kontula	-	0.54	0.89
Nummi-Pusula	0.46	0.31	0.73
Vt 2 pl 100+17	0.73	-	-
Vt 2 pl 114+80	0.47	-	-
Vt 2 pl 100+40	0.68	-	-
Otaniemi	0.57	-	-
Jyväskylä	-	-	0.70
Oulunsuu	0.37	0.55	0.57
Kempele-Oulunsalo	0.86	0.88	0.55

5.4.2 Teoreettinen kevätkantavuuskertoimen arviointi

Kevätkantavuusprojektissa Palolahti et al. /1993/ tarkasteli sulamisvaiheen lyhyen ajan jännitystilaa ja maalajin routivuusominaisuuksien vaikutusta kantavuusmoduuliin päätyen kaavaan 8. Yksinkertaistetussa kaavassa 9 on otaksuttu, että pohjamaan pinnalla vallitseva kokonaiskuormitus σ_0 vastaa pohjamaan konsolidaatiojännitystä σ_c ja että huokospainetta kehittyy pelkästään ajoneuvojen aiheuttamasta lisäjännityksestä $\Delta\sigma$. Maapohjan oletetaan olevan keväällä täysin vedellä kyllästetty, eli huokospainekerroin $\bar{B} = 1$, ja kesällä maapohjan oletetaan olevan kuiva ja huokospainekerroin $\bar{B} = 0$. Otaksuen, että kantavuusmoduuli voidaan arvioida kaavojen 8-10 mukaan, kevätkantavuuskerroin voidaan laskea likimäärin kaavan 11a avulla.

$$E = m \cdot \sigma_v \cdot \left(\frac{\sigma_c - \bar{B} \Delta \sigma - u_0}{\sigma_v} \right)^n \quad (8)$$

$$E_{\text{keväät}} = m \cdot \sigma_v \cdot \left(\frac{\sigma_0 - \bar{B} \Delta \sigma}{\sigma_v} \right)^n \quad ; \bar{B}=1 \quad (9a)$$

$$E_{\text{kesä}} = m \cdot \sigma_v \cdot \left(\frac{\sigma_0 - \bar{B} \Delta \sigma}{\sigma_v} \right)^n \quad ; \bar{B}=0 \quad (9b)$$

$$\sigma_0 = \gamma Z + \Delta \sigma \quad (10)$$

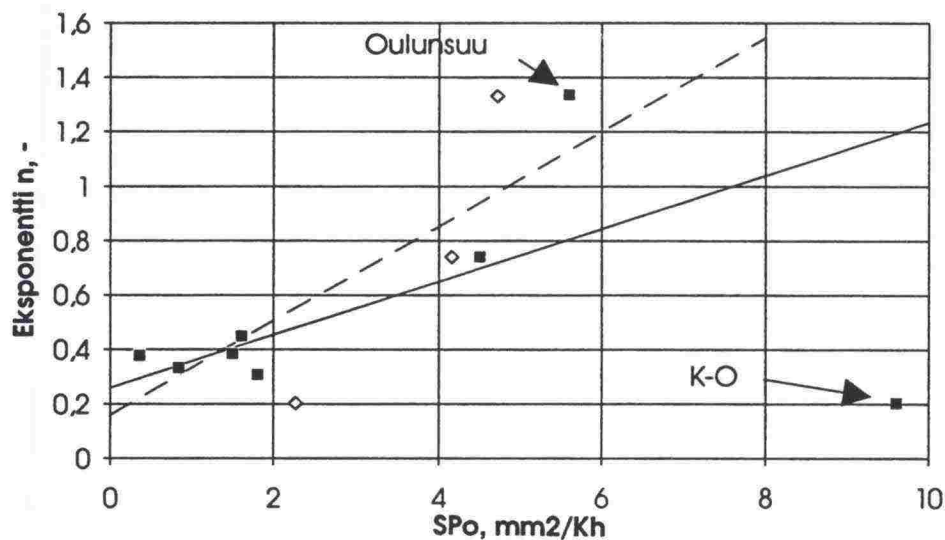
$$kkk = \left(\frac{\gamma Z}{\gamma Z + \Delta \sigma} \right)^n \quad (11a)$$

$$n = \frac{\ln(kkk)}{\ln\left(\frac{\gamma z}{\gamma z + \Delta\sigma}\right)} \quad (11b)$$

E	on	kantavuusmoduuli, MN/m ²
m,n		maalajista ja maan routivuudesta riippuvia kertoimia
σ_c		pohjamaan konsolidaatiojännitys, kPa
σ_0		pohjamaan pinnalla vallitseva pystysuora kokonaisjännitys, kPa
σ_v		vertailujännitys, 1 kPa
\bar{B}		huokospainekerroin, -
u_0		alkutilan huokospaine, kPa
kkk		kevätkantavuuskerroin
γz		maapilarin paino syvyydellä z, kPa
$\Delta\sigma$		liikenteen aiheuttama lisäjännitys pohjamaan pinnalla, kPa

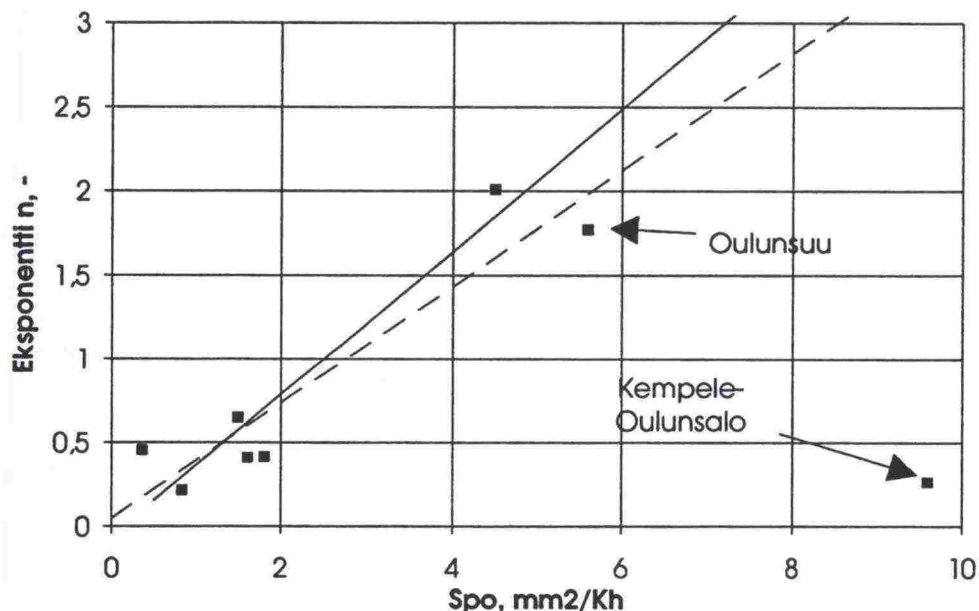
Kokonaisjännityksen arvona ($\gamma z + \Delta\sigma$) on käytetty vakioarvoa 40 kPa. Kaavoissa esiintyvän eksponentin n on havaittu riippuvan maan routivuudesta ja näin ollen mm. segregatiopotentiaalista kuvan 12 mukaisesti /Palolahti et al. 1993/. Kuvaan on lisätty tässä tutkimuksessa saadut tulokset. Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon tulokset eroavat muista tuloksista huomattavasti. Yhtenäinen viiva kuvaa yhteyttä, jossa molemmat Oulun kohteet on huomioimatta ja katkoviiva yhteyttä, jossa vain Kempele-Oulunsalon tulos on huomioimatta. Tulosten erot saattavat johtua erilaisesta käytännöstä routanousukokeissa.

Kuvassa 13 on esitetty eksponentin n ja segregatiopotentiaalin välinen vuorosuhde, kun kaavassa 11b kokonaisjännityksenä ei käytetä vakioarvoa, vaan laskettua arvoa ($\gamma z + \Delta\sigma$). Rakennekerroksen tilavuuspainona on käytetty 20 kN/m³. Auton rengaspainetta kuvaavan pintakuorman 700 kPa (vastaa pyöräkuormaa 50 kN) aiheuttama jännitys ($\Delta\sigma$) tarkasteltavalla syvyydellä on laskettu Bisar-ohjelmalla.



- SPo, lab $n = 0.173 \cdot SPo + 0.159$
 $R^2 = 0.84$
 ◇ SPo, in situ $n = 0.0975 \cdot SPo + 0.259$
 $R^2 = 0.79$

Kuva 12. Laboratoriossa määritetyn sekä in situ segregaatiopotentiaalin ja kaavalla 11b lasketun n -eksponentin välinen vuorosuhde. Kokonaisjännityksenä on käytetty vakioarvoa 40 kPa. Kuvassa on tutkimuksen Palolahti et al. /1993/ ja tämän tutkimuksen yhteydessä saadut tulokset.



- SPo, lab $n = 0.347 \cdot SPo + 0.043$ $n = 0.425 \cdot SPo - 0.06$
 $R^2 = 0.87$ $R^2 = 0.86$

Kuva 13 Laboratoriossa määritetyn segregaatiopotentiaalin ja havainnoista kaavalla 11b lasketun n -kertoimen välinen vuorosuhde. Kokonaisjännityksenä on käytetty laskettuja arvoja ($\gamma z + \Delta \sigma$). Kuvassa on Palolahti et al.:n /1993/ ja tämän tutkimuksen yhteydessä saadut tulokset.

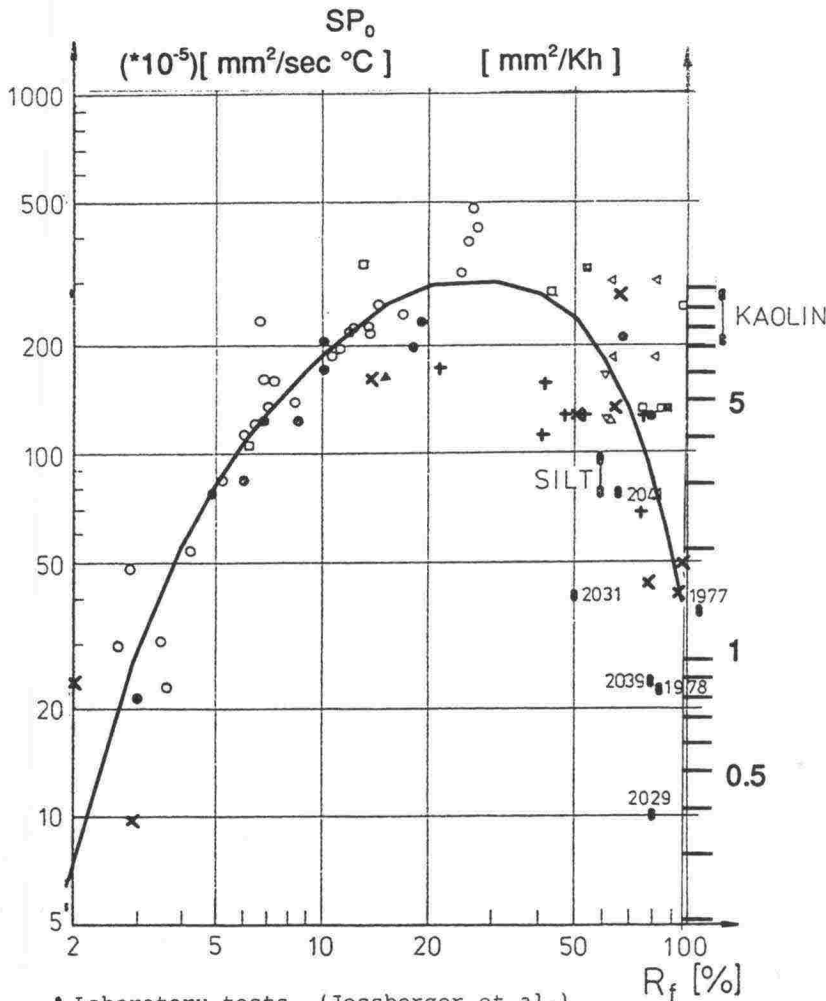
Maalajin routivuuteen vaikuttavat mm. maalajin hienoaineksen määrä, hienoaineksen savipitoisuus ja juoksuraja. Rieke et al. /1983/ on yhdistänyt nämä tekijät kaavan 12 hienoustekijällä. Hienoustekijä voidaan laskea myös kaavalla 13 /Knutsson et al. 1985/. Kaavaa 13 käytettäessä voidaan käyttää myös raekokoa 0.5 mm vastaavan seulan läpäisyprosenttia 0.4 mm:n raekokoa vastaavan läpäisyprosentin sijasta ja vastaavasta aineksesta määritettyä juoksurajaa /Friberg et al. 1989/. Juoksurajaa vastaa likimääräisesti kartiokokeella määritetty hienousluku. Tässä tutkimuksessa tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella kartiokokeen hienousluvut olivat keskimäärin 3.5 %-yksikköä suurempia kuin Casagranden koputuskokeella määritetyt juoksurajat.

$$R_f = \frac{(\% \leq 0.002 \text{ mm})}{w_L(0.074 \text{ mm})} * 100\% \quad (12)$$

$$R_f = \frac{(\% \leq 0.002 \text{ mm}) (\% \leq 0.074 \text{ mm})}{(\% \leq 0.4 \text{ mm}) w_L(0.4 \text{ mm})} * 100\% \quad (13)$$

R_f	on	hienoustekijä (Fines factor), %
$\% \leq 0.002 \text{ mm}$		savipitoisuus, %
$\% \leq 0.074 \text{ mm}$		hienoainespitoisuus, %
$\% \leq 0.4 \text{ mm}$		0.4 mm:ä pienemmän aineksen määrä, %
$w_L(0.074 \text{ mm})$		0.074 mm seulan läpäisille ainekselle määritetty juoksuraja, %
$w_L(0.4 \text{ mm})$		0.4 mm seulan läpäisille ainekselle määritetty juoksuraja, %

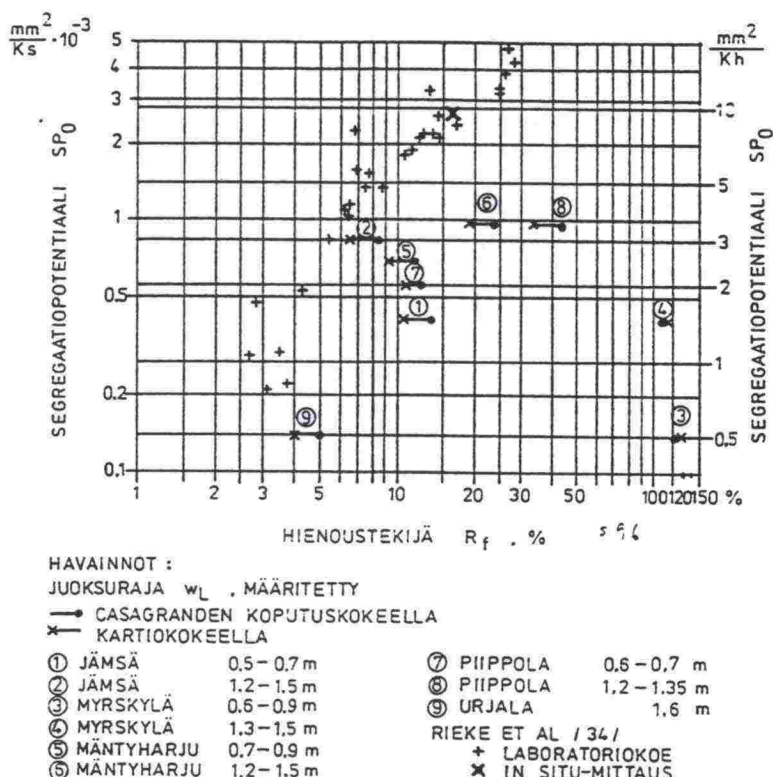
Segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän R_f välillä on havaittu vallitsevan kuvan 14 mukainen vuorosuhde /Jessberger et al. 1989/. Kuvaan on lisätty tässä tutkimuksessa saadut pisteet sekä Saarelaisen ja Toivosen /1991/ havainnot valtatie 3:lta. Kuvaan on piirretty käyrä kuvaamaan ko. vuorosuhdetta.



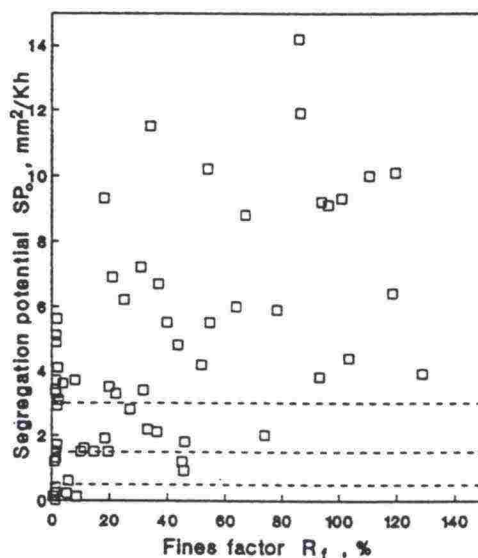
- Laboratory tests (Jessberger et al.)
- In-situ tests (Knutsson et al., 1985)
- ▲ Öjeby silt (laboratory test) (Knutsson et al., 1985)
- Agassiz silt (large scale lab test) (Knutsson et al., 1985)
- Laboratory tests (Rieke et al., 1983)
- Mackenzie valley soils (Penner, Ueda, 1978)
- △ La grande till (Pare et al., 1978)
- ▽ Devon silt (Konrad and Morgenstern, 1982)
- ◊ Calgary silt (Konrad and Morgenstern, 1983)
- x Laboratoriokokeet, /Hentilä 1994 ja Palolahti et al. 1993/
- + Laboratoriokokeet, /Saarelainen ja Toivonen 1991/

Kuva 14. Segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän välinen vuorosuhde eri tutkijoiden mukaan.

Friberg et al. /1989/ on myös tutkinut routivuuskriteerien kehittämisprojektissa edellä olevaa yhteyttä segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän välillä ja päätenyt suomalaisista maalajeista rakennetuilla näytteillä hieman alempiin segregaatiopotentiaalin arvoihin (kuva 15). Kuvassa 16 on Kujalan /1991/ saama vuorosuhde samoille tekijöille. Kuvasta ei voi havaita samanlaista yhteyttä kuin kuvien 14 ja 15 koetuloksista.



kuva 15. Segregaatiopotentiaali hienoustekijän funktiona /Friberg et al. 1989/.



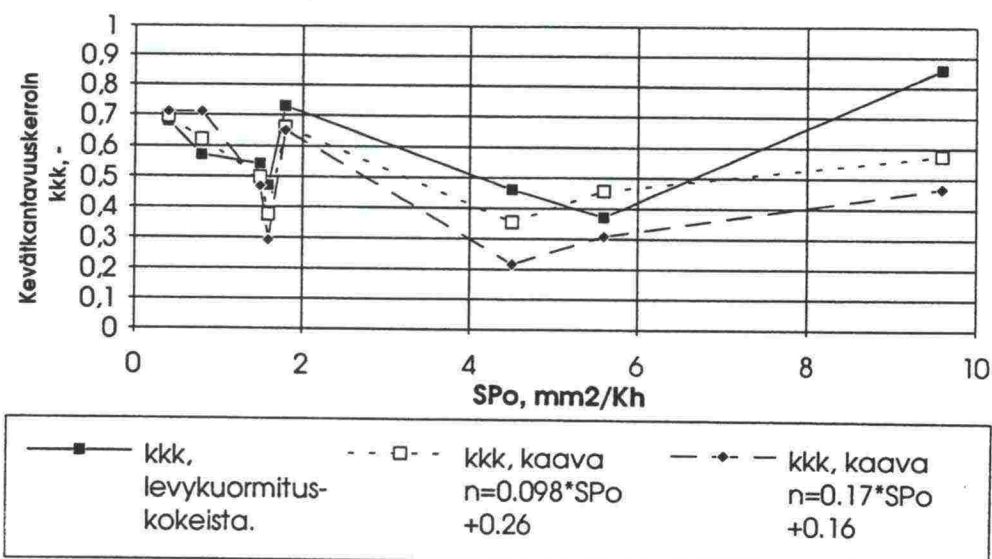
Kuva 16. Segregaatiopotentiaalin ja hienoustekijän välinen suhde /Kujala 1991/.

Taulukossa 8 on esitetty Palolahti et al:n /1993/ esittämän mallin (kaava 11a) mukaan määritetyt kevätkantavuuskertoimen arvot, kun segregaatiopotentiaali on määritetty hienoustekijän avulla kuvasta 14 ja kerroin n segregaatiopotentiaalin avulla kuvan 12 yhtenäisellä viivalla piirretyistä kuvaajasta, jossa Oulun kohteet on huomioimatta.

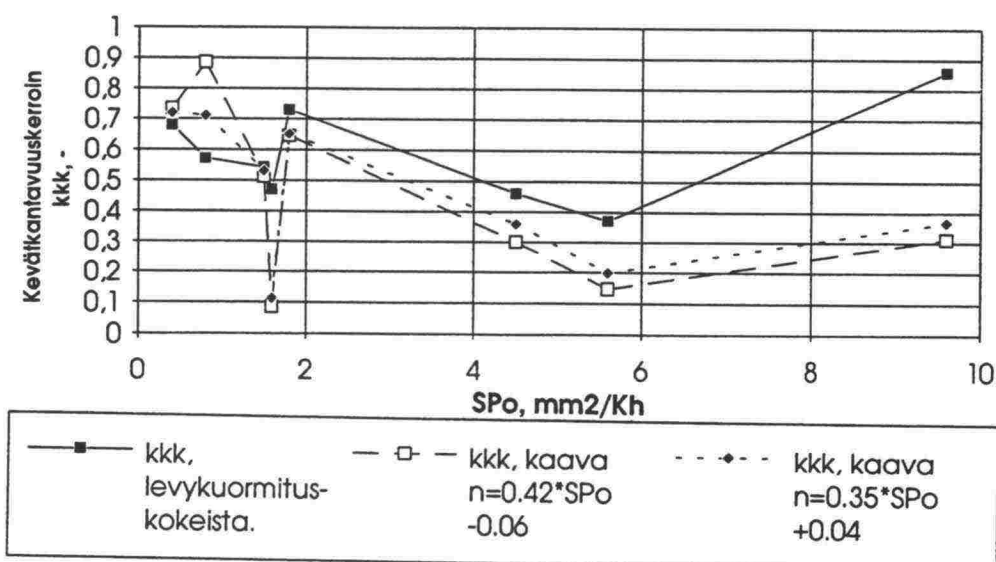
Taulukko 8. Kevätkantavuuskertoimen laskenta. Tutkimusten /Hentilä 1994/, /Palolahti et al. 1993/ ja /Saarelainen ja Toivonen 1991/ havainnot.

Tutkimus- kohde	Rf %	Sp ₀ mm ² /Kh	n -	γ kN/m ³	z m	kkk -	kkk -
	lähtö- arvo	kuvasta 14	kuvasta 12	lähtö- arvo	lähtö- arvo	kaava 11a	levyk. kokeis- ta
Kontula	96.7	1.8	0.43	20	0.4	0.50	0.54
N-P	50.6	7.46	0.99	20	0.7	0.35	0.46
P-O pl 100+17	100	1.5	0.41	20	0.72	0.66	0.73
P-O pl 114+80	80	3.3	0.58	20	0.37	0.38	0.47
P-O pl 100+40	3.0	1.0	0.36	20	0.42	0.69	0.68
Otaniemi	2.05	0.25	0.28	20	0.37	0.62	0.57
Jyväskylä	64.1	5.0	0.75	20	1.0	0.60	0.70
Oulunsuu	13.5	8.2	1.06	20	0.95	0.45	0.37
Kempele- Oulunsalo	65.9	5	0.75	20	0.95	0.57	0.86
VT 3 pl:							
66000-66800	91.3	2.1	0.46	20	1.2	0.79	-
73035-73270	78.6	3.5	0.60	20	1.2	0.74	-
76760-77160	84.6	2.7	0.52	20	1.2	0.77	-
77480-77550	55	7.1	0.95	20	1.2	0.62	-
79200-79250	72.1	4.1	0.66	20	1.2	0.71	-
66203, v 41.5m	76	4.0	0.65	20	1.2	0.72	-
67450, vas 30m	76.7	4.0	0.65	20	1.2	0.72	-
73260, vas 25m	40.2	9.5	1.19	20	1.2	0.54	-
75600, vas 10m	41.0	9.4	1.18	20	1.2	0.55	-
76300, vas 10m	53.2	7.3	0.97	20	1.2	0.61	-
77360, vas 60m	46.3	8.1	1.05	20	1.2	0.58	-
79500, vas 10m	20.9	10.5	1.28	20	1.2	0.52	-

Kuvassa 17 on esitetty kohteittain levykuormituskokeista lasketut kevätkantavuuskertoimet, kaavalla 11a arvioidut kertoimet ja näitä vastaavat segregatiopotentialit SP_0 . Kuvasta huomataan, että kaavalla 11a lasketut kevätkantavuuskertoimet eroavat vähemmän levykuormituskokeilla määritetyistä kertoimista, kun käytetään kuvasta 12 saatavaa n kerrointa, jossa Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon kohteet on huomioimatta. Kuvassa 18 on esitetty kohteittain levykuormituskokeista lasketut kevätkantavuuskertoimet sekä kaavalla 11a arvioidut kertoimet, kun kokonaisjännityksenä on käytetty laskettuja arvoja.

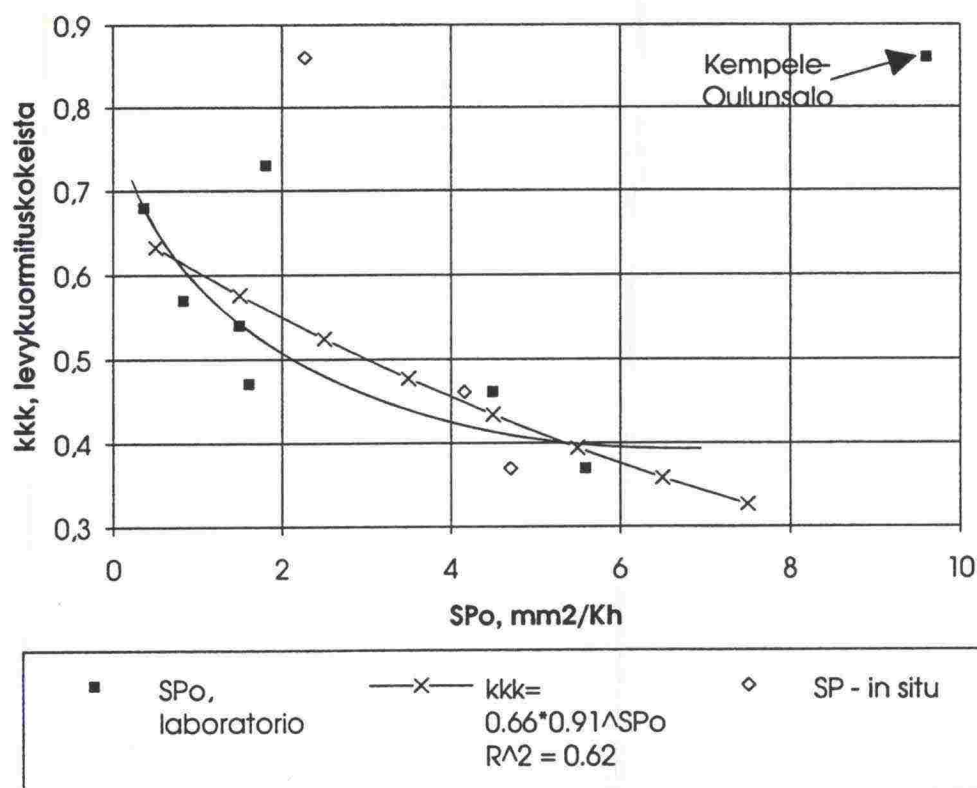


Kuva 17. Levykuormituskokeilla ja kaavalla 11a määritettyjen kevätkantavuuskertoimien ja laboratoriossa määritettyjen segregatiopotentialien välinen vuorosuhde. Kokonaisjännityksenä on käytetty vakioarvoa 40 kPa.



Kuva 18. Levykuormituskokeilla ja kaavalla 11a määritettyjen kevätkantavuuskertoimien sekä laboratoriossa määritettyjen segregatiopotentialien välinen vuorosuhde. Kokonaisjännityksenä on käytetty laskettuja arvoja ($\gamma z + \Delta \sigma$).

Koska kevätkestävyyskerroin riippuu pääasiassa maan routivuudesta, se on riippuvainen routanoususta ja segregatiopotentiaalista. Havaittu yhteys riippuu myös kunkin havaintokauden sääolosuhteista, joten eri havaintokausilta saadut tulokset voivat poiketa toisistaan. Kuvassa 19 esitettyssä segregatiopotentiaalin ja kevätkestävyyskerroimen välisessä vuorosuhteessa Kempele-Oulunsalon piste eroaa huomattavasti muista, joten sitä ei ole huomioitu teoreettista kuvaajaa laskettaessa.



Kuva 19. Kevätkestävyyskerroimen ja segregatiopotentiaalin välinen vuorosuhte.

6 ROUDAN SYVYYDEN JA ROUTANOUSUN ARVIOIMINEN

6.1 Maan lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja pakkasmäärään perustuvat menetelmät

6.1.1 Roudan syvyyden arviointi

a) Stefan'in yhtälö

Stefanin mukaan roudan syvyys voidaan arvioida kaavoilla 14 ja 15 /Stefan 1890/. Saarelainen /1992/ ja McCormick /1993/ ovat tutkimuksissaan käyttäneet roudan syvyyttä arvioitaessa Stefanin yhtälöä.

(14)

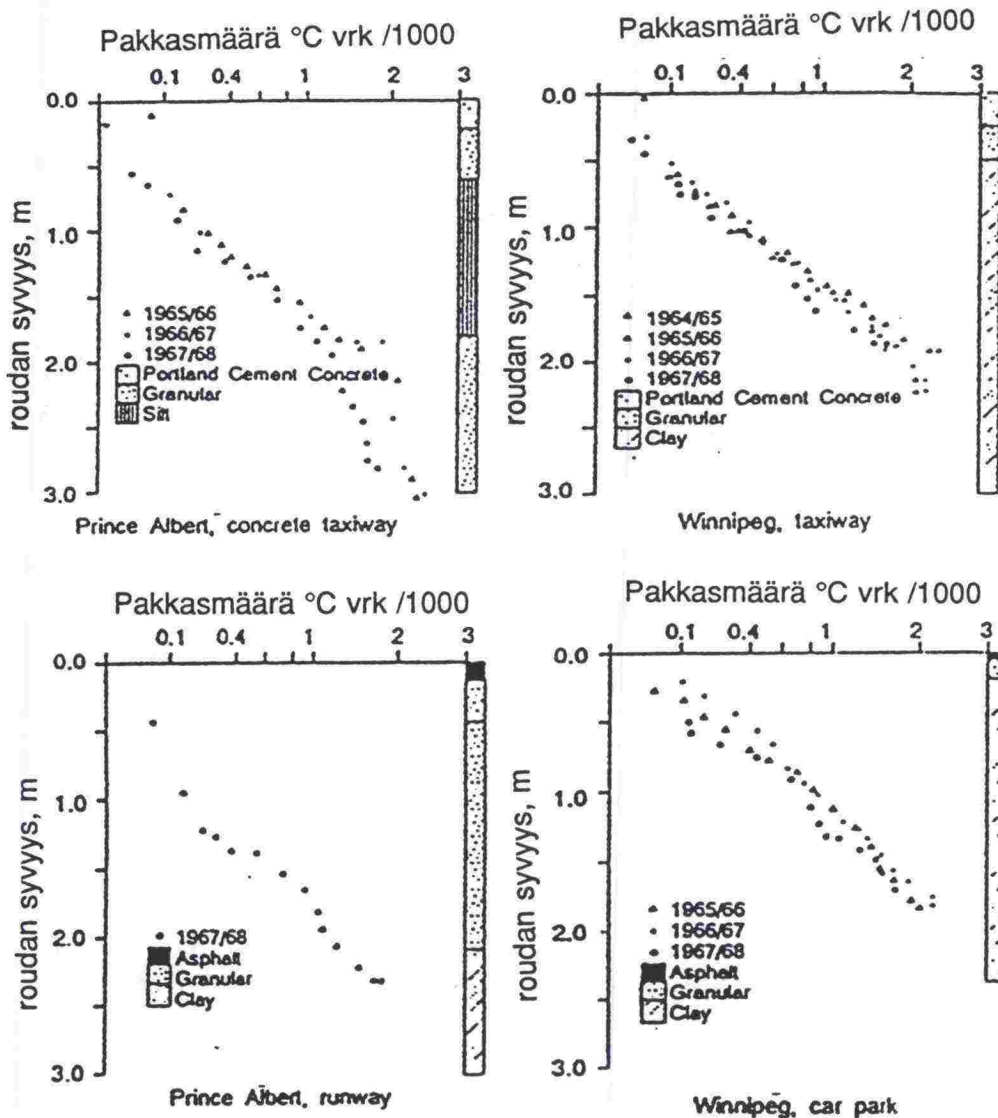
$$z_f = k\sqrt{F}$$

$$k = \sqrt{\frac{7200 * \lambda_f}{q}} \quad (15)$$

z_f	on	roudan syvyys, m
k		kerroin, $m/(Kh)^{0.5}$
F		pakkasmäärä, Kh
λ_f		jäätyneen maan lämmönjohtavuus, $W/m^{\circ}C$
q		maaperän jäätymislämpö, J/m^3

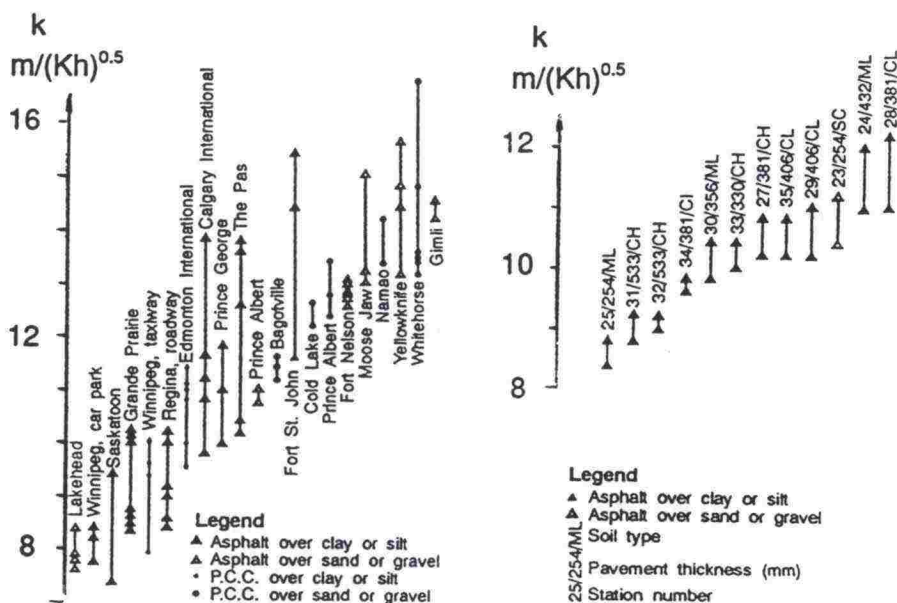
Saarelainen on saanut roudan syvyyttä laskiessaan kertoimelle k kokeellisia arvoja välille $9.8 \cdot 10^{-3}$ - $11.2 \cdot 10^{-3}$. Tulokset on esitetty maalajeittain taulukossa 9.

McCormick on tutkinut roudan syvyyttä pakkasmäärän suhteen 19:lla Kanadan lentokentällä ja 12:ssa kohteessa Saskatchewan valtateillä. k -kertoimen määrittämiseen Kanadan lentokentillä käytettiin vuosien 1965-1970 aikana kerättyjä tietoja. Roudan syvyys määritettiin Gandahlin routaputkia käyttäen. Mittaukset tehtiin lumelta auratuilla alueilla, joiden päällysrakenteena oli asfaltti tai betoni. Roudan syvyyttä mitattiin viikottain ensimmäisistä pakkasista lähtien roudan sulamiseen asti. Jokaisella lentokentällä oli sää-asema. Päivän keskilämpötilat saatiin kuukausittaisista Kanadan ympäristö-raporteista. Roudan syvyyttä mitattaessa laskettiin sen hetkinen pakkasmäärä. Näistä havaintopareista piirrettiin kuvan 20 mukaiset kuvaajat. Samassa kuvassa on esitetty lentokenttien tutkimuspisteiden maapohjan profiili.



Kuva 20. Roudan syvyys pakkasmäärän suhteen /McCormick 1993/.

Kertoimen k arvo laskettiin näistä kuvaajista niinä talvina, kun mittauksia tehtiin. Kuvasta 20 huomataan, että Prince Albertin lentokentällä k -arvolle saadaan merkittävä ero, kun verrataan asfaltilla ja betonilla päällystettyä maapohjaa. Winnipegin lentokentällä ei samanlaista eroa havaita päällysmateriaalien vaikutuksesta. Tämä selittyy sillä, että asfaltti absorboi auringon valoa enemmän kuin betoni. Winnipegissä sensijaan oletetaan asfaltin ja betonin tummuuden tasoittuneen ajan kuluessa lian vuoksi /McCormick 1993/. Kertoimen k arvot, maapohjan vallitseva tyyppi, pakkasmäärä ja roudan syvyys eri lentokentillä ja valtateillä on esitetty liitteissä 7 ja 8. Kertoimen k vaihtelua on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. k -kertoimen arvoja päällysrakenteen ja maapohjan vaihdellessa Kanadan lentokentillä ja Saskatchewan valtateillä /McCormick 1993/.

Saskatchewan valtateillä mitattiin roudan syvyyksiä vuosina 1963-1965 /Culley 1967/. Kaikissa kohteissa oli soran päällä asfaltti. Rakenteen paksuus oli vaihdellen 254 ja 533 mm.

Kuvasta 21 huomataan, että teillä tehdyissä mittauksissa k -arvojen hajonta on pienempi kuin lentokentillä tehdyissä. Tämä voi johtua siitä, että tien rakenne on yksinkertaisempi kuin lentokentän rakenne /McCormick 1993/.

McCormick'in tuloksista on esitetty taulukossa 9 kertoimelle k keskiarvoja erilaisissa maalajeissa. Taulukossa on lisäksi Oraman julkaisemattomia havaintoja vuosilta 1958 - 1993.

Taulukko 9. k-kertoimen arvoja McCormick:n, Saarelaisen ja Oraman mukaan erilaisille maalajeille.

	McCormick /1993/		Saarelainen /1992/		Orama, havaintoja vv. 1958-1993	
Maalaji	havain- tojen määrä	k-kerroin $m^*(Kh)^{-0.5}$ $*10^{-3}$	havain- tojen määrä	k-kerroin $m^*(Kh)^{-0.5}$ $*10^{-3}$	havain- tojen määrä	k-kerroin $m^*(Kh)^{0.5}$ $*10^{-3}$
Sa	42	10.2			3	9.6-10.1
Sa hyvin plastinen	10	9.7				
Sa vähän plastinen	6	10.9				
siSa			2	10.7		
saSi			4	9.8-10.7	1	6.2
Si vähän plastinen	6	10.0				
hkSi	5	12.0			9	8.1
saHk	2	10.8				
siHk(Mr)			36	10.5-11.6	14	10
Hk	32	12.9	2	11.2	16	11.4
Sr					4	13.9
SiMr					6	8.4
HkMr					9	12.3

Kun tässä työssä tutkittuja kohteita verrataan maalajien perusteella McCormick'in aineiston maalajeihin, saadaan keskimääräisen k-arvon ja pakkasmäärän avulla laskettua Stefanin yhtälöllä taulukon 11 routasyvyyydet. Pakkasmäärä on laskettu Ilmatieteen laitoksen antamien vuoden 1990-1991 vuorokausilämpötilojen perusteella.

b) Muunnettu Berggren'in yhtälö

Phukan /1985/ käyttää roudan syvyyttä laskiessaan muunnettua Berggrenin yhtälöä (kaavat 16,17 ja 18). Tällä yhtälöllä saadaan roudan syvyyden lisäksi laskettua sulamissyvyys, jolloin pakkasmäärän tilalla käytetään lämpöastesummaa [$^{\circ}\text{Ch}$].

$$z_f = \Lambda \sqrt{\frac{7200 \lambda_a n F}{q}} \quad (16)$$

$$\alpha = \frac{V_0}{V_s} \quad (17)$$

$$\mu = \frac{C}{L} * V_s \quad (18)$$

z_f	on	roudan syvyys, m
λ_a		keskimääräinen maan lämmönjohtavuus, W/ m $^{\circ}\text{C}$
n		kerroin, -
F		ilman pakkasmäärä, $^{\circ}\text{C h}$
q		maaperän jäätymislämpö, J/m ³
Λ		lämpövakio, α :n ja μ :n funktio, kuvasta 22.
α		lämpösuhde, -
μ		parametri, -
V_0		tutkimuskohteen vuosittainen keskimääräinen lämpötila, $^{\circ}\text{C}$
V_s		pakkaskauden keskilämpötila, $^{\circ}\text{C}$
C		maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m ³ $^{\circ}\text{C}$

Maan lämmönjohtavuudet saadaan laskettua mm. Kerstenin vuonna 1949 kokeellisesti määrittämällä kaavoilla. Kaavassa 16 käytetty keskimääräinen lämmönjohtavuus saadaan jäätyneen ja sulan maan lämmönjohtavuuksien keskiarvosta. Kaavoilla 19 ja 20 saadaan hienorakeisen maalajin lämmönjohtavuudet kuivairtoihyden ja vesipitoisuuden avulla.

$$\lambda_u = (0.13 * \log w - 0.029) * 10^{0.62 * p_d} \quad (19)$$

$$\lambda_f = 0.00144 * 10^{1.373p_d} + 0.01226 * 10^{0.499p_d} * w \quad (20)$$

Karkearakeisten maalajien lämmönjohtavuudet saadaan laskettua kaavojen 21 ja 22 avulla.

$$\lambda_u = (0.10 * \log w + 0.058) * 10^{0.62p_d} \quad (21)$$

$$\lambda_f = 0.01096 * 10^{0.8116p_d} + 0.00461 * 10^{0.9115p_d} * w \quad (22)$$

λ_u	on	sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_f		jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
p_d		kuivairtitiheys, g/cm ³
w		vesipitoisuus, paino%

Lämmönjohtavuudet saadaan myös liitteen 6 käyrästä.

Maan tilavuuslämpökapasiteetti saadaan yhtälöistä 23 ja 24 /Phukan 1985/.

$$C_f = p_{df}(0.17 + 0.5w) \quad (23)$$

$$C_u = p_d(0.17 + 1.0w) \quad (24)$$

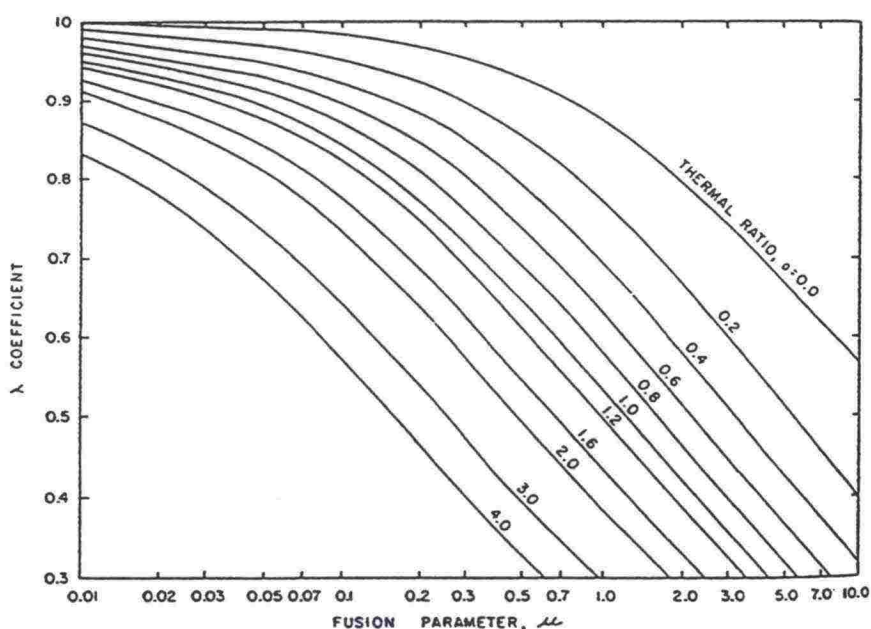
C_f	on	jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m ³ °C
C_u		sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, J/m ³ °C
p_d		sulan maan kuivairtitiheys, g/cm ³
p_{df}		jäätyneen maan kuivairtitiheys, g/cm ³

Maan olomuodonmuutokseen kuluva energia saadaan yhtälöstä 25.

$$q = \rho_d w q_w \quad (25)$$

q on maaperän jäätymislämpö, J/m³
 q_w veden jäätymislämpö, 333 kJ/kg

Lämpövakio Λ saadaan kuvan 22 mukaisesti parametrin μ ja lämpösuhteen α funktiona.



Kuva 22. Lämpövakio Λ parametrien α ja μ suhteen /Phukan 1985/

Tällä menetelmällä lasketut roudan syvyydet on esitetty taulukossa 11.

c) Roudan syvyys kerroksellisessa maassa

Mikäli halutaan laskea useampikerroksisessa maarakenteessa syntyvä roudan syvyys, voidaan se laskea kaavojen 26 - 32 avulla. Mikäli maa ei ole täysin jäätynyt, voidaan maan lämmönjohtavuus laskea kaavalla 26 sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuuksista jäätyneessä maassa sulana pysyvän veden määrän avulla /Helander 1985/.

$$\lambda_t = \lambda_f + (\lambda_u - \lambda_f) * \frac{w_u}{w} \quad (26)$$

λ_t	on	lämmönjohtavuuden laskenta-arvo, W/mK
λ_f		jäätyneen maan lämmönjohtavuus, W/mK
λ_u		sulan maan lämmönjohtavuus, W/mK
w_u		jäätymättömän veden määrä, %
w		vesipitoisuus, %

Jäätymättömän veden määrä saadaan kaavasta 27 /Andersland et al. 1978/. Kaavalla lasketut arvot on esitetty taulukossa 10, jossa on myös Kujalan /1991/ aineiston perusteella (liite 9d) arvioidut jäätymättömän veden määrät kohteittain. Kujala määrittä jäätymättömän veden määrän jäätyneessä maanäytteessä NMR-menetelmällä (nuclear magnetic resonance).

Eri menetelmillä arvioidut jäätymättömän veden määrät vastaavat Kontulan, Nummi-Pusulan ja Jyväskylän kohteissa kohtalaisen hyvin toisiaan. Oulunsuun ja Kempele-Oulunsalon kohteiden arvoissa on suurempaa eroa. Edellämainittujen kohteiden maalajeja oli Kujalan aineistossa edustettuna vähän (2-3), joten valittu indeksiarvo ei välttämättä ole lähellä oikeaa.

$$w_u = e^{0.2618 + 0.5519 * \ln S - 1.449 * S^{-0.264} * \ln |T|} \quad (27)$$

w_u	on	jäätymättömän veden määrä, %
e		neperin luku, -
S		maan ominaispinta-ala, m ² /g
T		lämpötila, °C

Taulukko 10. Jäätymättöman veden määrä kaavan 27 /Andersland et al. /1978/ ja Kujalan /1991/ aineiston perusteella.

Tutkimus- kohde	Ominais- pinta-ala S, m ² /g	Jäätym. veden määrä, kaava 27 %	Jäätym. veden suht. määrä α, /Kujala 1991/ -	Vesipitoi- suus w, %	Jäätym. veden määrä, /Kujala 1991/ α*w %
Kontula	48.5	6.9	0.142	50	7.1
Nummi- Pusula	5.16	1.4	0.064	29.5	1.9
P-O pl 100+17	-	-	0.014	23.8	0.33
P-O pl 114+80	-	-	0.014	33.2	0.46
P-O pl 100+40	-	-	0.0145	21.5	0.31
Otaniemi	-	-	0.088	8.9	0.78
Jyväskylä	19.7	3.7	0.148	20.6	3.0
Oulunsuu	5.56	1.4	0.039	15.8	0.6
Kempele- Oulunsalo	21	3.8	0.014	31.1	0.44

Sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti lasketaan kaavalla 28 ja jäätyneen kaavalla 29 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/

$$C_u = \frac{\rho_d}{\rho_w} * (0.18 + 1.0 * \frac{w}{100}) * C_w \quad (28)$$

$$C_f = \frac{\rho_d}{\rho_w} * (0.18 + 0.5 * \frac{w}{100}) * C_w \quad (29)$$

C_u	on	sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m ³ K
C_f		jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m ³ K
C_w		veden tilavuuslämpökapasiteetti, Wh/m ³ K
ρ_d		kuivairtoteihs, g/cm ³
ρ_w		veden tiheys, 1g/cm ³

Olomuodonmuutoslämpö saadaan kaavalla 30 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/.

$$Q = C_u * V_0 + w * \rho_d * q_w + 0.5 * C_f * |V_s| \quad (30)$$

q	on	olomuodonmuutoslämpö, Wh/m ³
V_0		vuoden keskilämpötila, °C
V_s		pakkaskauden keskilämpötila, °C
w		vesipitoisuus, -
q_w		veden jäätymislämpö, 93 Wh/kg

Kerrosten jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä saadaan kaavalla 31. Kun pakkasmäärä ei riitä jäädyttämään koko kerrosta lasketaan jäljellä oleva pakkasmäärä kaavalla 32 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/.

$$F_n = q_n * d_n * \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{2 * \lambda_n} \right) \quad (31)$$

$$F_n = F - \sum_{k=1}^{n-1} F_k \quad (32)$$

F_n	on	osittain jäätyvään kerrokseen vaikuttava pakkasmäärä, Kh
F		pakkasmäärä, Kh
F_k		kerroksen k jäätymiseen tarvittu pakkasmäärä, Kh.

Roudan syvyys osittain jäätyvässä kerroksessa saadaan kaavalla 33 /Talonrakennuksen routasuojausohjeet 1987/.

$$d_n = -\lambda_n * \sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} + \sqrt{\lambda_n^2 * \left(\sum_{k=1}^{n-1} \frac{d_k}{\lambda_k} \right)^2 + 2 * \frac{\lambda_n}{q_n} * F_n} \quad (33)$$

n	on	tarkasteltavan kerroksen numero, -
F_n		osittain jäätyvään kerrokseen vaikuttava pakkasmäärä, Kh
q_n		kerroksen n jäätyessä vapautuva lämpömäärä, Wh /m ³
d_k		kerroksen k paksuus, m
λ_k		kerroksen k lämmönjohtavuus, W/mK.

Taulukossa 11 on esitetty kaavalla 33 lasketut routasyvyydet tutkituissa kohteissa vuoden 1990-1991 lämpötilatilastojen mukaan. Taulukossa on myös vuonna 1991 mitatut routasyvyydet. Maakerrosten lämmönjohtavuudet on laskettu Kerstenin kaavojen 19 - 22 avulla. Jäätymättömän veden määrä on arvioitu Kujalan /1991/ aineiston perusteella (taulukko 10), koska kaikista kohteista ei ole määritetty ominaispinta-alaa. Pakkasmäärät saadaan taulukoista 1 ja 2 /Palolahti et al. 1993/.

Taulukko 11. Roudan syvyydet eri tutkimuskohteissa vuoden 1991 pakkasmäärillä laskettuna sekä samana vuonna mitatut roudan syvyydet.

Tutkimuskohde	Roudan syvyys (kaava 16) (Phukan 1985) m	Roudan syvyys (kaava 14) (Orama 1993) m	Roudan syvyys (kaava 14) (McCor-mick 1993) m	Roudan syvyys (kaava 33) m	Mitatun roudan syvyys v. 1991 m
Kontula	0.69	0.98	0.89	0.85	0.81
Nummi-Pusula	0.93	0.7	1.10	1.1	1.2
P-O pl 100+17	0.99	1.1	1.10	1.2	--
P-O pl 114+80	0.89	1.1	1.1	1.0	--
P-O pl 100+40	1.28	1.1	1.2	1.1	--
Otaniemi	1.03	1.25	1.3	1.2	--
Jyväskylä	1.34	0.9	1.4	1.6	1.3
Oulunsuu	1.60	1.3	1.9	1.9	1.63
Kempele-Oulunsalo	1.35	1.6	1.6	1.4	1.6

6.1.2 Routanousun arviointi

Saarelainen on saanut routanousulle kaavan 34 mukaisen yhteyden segregatiopotentialin, pakkasmäärän ja k-kertoimen suhteen. Tällä kaavalla saadut routanousut on esitetty taulukossa 14. Segregatiopotentialin arvona on käytetty in-situ arvoa (Liite 11). Kun sitä ei ole määritetty, on segregatiopotentialin arvo laskettu kaavalla 39 käyttäen kokonaiskuormituksen kaavalla 41 saatavaa arvoa. Niissä kohteissa, joissa on mitattu roudan syvyyksiä, k-arvo on ratkaistu kaavasta 14. Muissa kohteissa k-arvo on laskettu kaavalla 33 saadusta roudan syvyydestä.

$$h = \frac{(2 SP \sqrt{F})}{(k * 1000)} \quad (34)$$

h	on	routanousu, mm
SP		in situ - segregatiopotentiali, mm ² /Kh
F		pakkasmäärä, Kh
k		kerroin, kaava 14

Friberg et al. /1989/ on laskenut Jämsässä sijaitsevan tutkimuskohteen routanousun segregatiopotentialin avulla. Seuraavassa lasketaan tämän työn kohteiden routanousut noudattaen Fribergin laskentatapaa.

Roudan aiheuttama kokonaisnousu saadaan huokosveden jäätymisen ja routarintamaan johtuneen veden jäätymisen aiheuttamien nousujen summana kaavalla 35 /Konrad 1980/.

$$\Delta h = \Delta h_i + \Delta h_s \quad (35)$$

Δh	on	kokonaisnousu, mm
Δh_i		in situ-jäätymisestä johtuva nousu, mm
Δh_s		segregaatiouroutanousu, mm.

Huokosveden jäätymisestä johtuva routanousu saadaan kaavalla 36 /Nixon 1982/.

$$\Delta h_i = 0.09 * n * S_r * \frac{(w - w_u)}{w} * \Delta d \quad (36)$$

Δh_i	on	huokosveden jäätymisestä johtuva nousu, mm
n		huokoisuus, -
S_r		kyllästysaste, -
w		vesipitoisuus, -
w_u		jäätymättömän veden määrä, -
Δd		jäätyvän kerroksen alkuperäinen paksuus, mm

Routarintamaan johtuneen veden aiheuttama segregaatioroutanousu saadaan kaavalla 37 /Nixon 1982/.

$$\Delta h_s = 1.09 * \Delta t * SP * \nabla T_f \quad (37)$$

Δh_s	on	routarintamaan joutuvan veden aiheuttama segregaatioroutanousu, mm
Δt		tarkasteltava ajanjakso, h
SP		todellista kuormitusta vastaava segregaatipotentiaali, mm ² /Kh
∇T_f		lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa, K/mm.

Keskimääräinen lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa saadaan kaavalla 38 /Konrad1980/.

$$\nabla T_{f,n} = \frac{|V_s|}{\sum_{k=1}^{n-1} (d_k + \Delta h_k) + \frac{d_n}{2}} \quad (38)$$

$\nabla T_{f,n}$	on	kerroksen n lämpötilagradientti, K /mm
V_s		pakkaskauden keskilämpötila, °C
$d_{k,n}$		kerroksen k ja n alkuperäinen paksuus, mm
Δh_k		kerroksen k kokonaisnousu, mm

Segregaatiopotentiaalin arvoon vaikuttaa routarintaman päällä olevien maamassojen kuormitus. Kokonaiskuormitusta vastaava segregaatiopotentiaali saadaan kaavalla 39 /Jessberger 1989/.

$$SP_{\sigma} = SP_0 * e^{-a*\sigma} \quad (39)$$

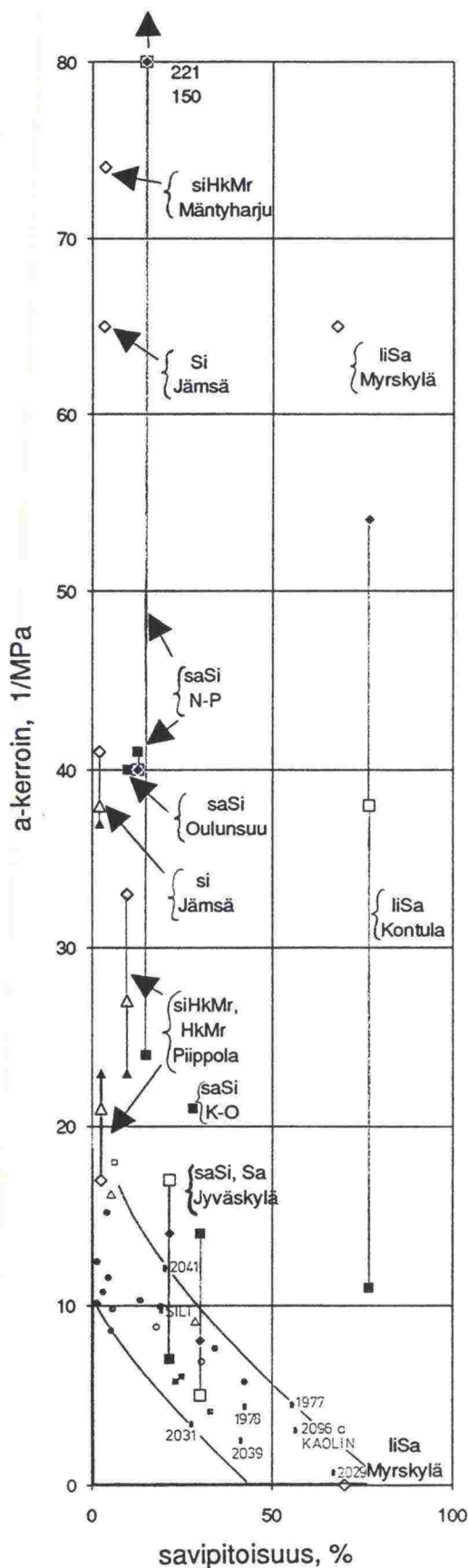
SP_{σ}	on	segregaatiopotentiaali kuormalla σ , mm ² /Kh
σ		kokonaiskuormitus, kPa
SP_0		segregaatiopotentiaali 0-kuormalla, mm ² /Kh
e		neperin luku, -
a		kerroin, 1/Mpa

Jessbergerin /1989/ mukaan kerroin a saadaan savipitoisuuden perusteella (kuva 23). Kerroin a (kaava 40) saadaan laskettua, mikäli routanousukokeita on tehty vähintään kahdella kuormitusportaalla. Taulukossa 12 on esitetty kohteiden savipitoisuudet ja laboratoriossa määritetyt segregaatiopotentiaalit eri kuormitusportailla σ_1 ja σ_2 . Taulukossa 13 on kuvasta 23 ja kaavalla 40 saadut a -kertoimen arvot sekä kaavalla 39 lasketut segregaatiopotentiaalit 70 kPa:n kuormituksella, joka on kaavalla 41 saatavan kokonaiskuormituksen keskimääräinen arvo tutkimuskohteissa.

$$a = \frac{\ln\left(\frac{SP_{\sigma_1}}{SP_{\sigma_2}}\right)}{(\sigma_2 - \sigma_1)} \quad (40)$$

Taulukko 12. Tutkimusten Palolahti et al. /1993/, Hentilä /1994/ ja Friberg et al. /1989/ kohteiden maanäytteiden savipitoisuudet ja segregaatiopotentiaalit eri kuormitusportailla.

Tutkimuskohde	Syvyys m	Savi- pitoisuus %	SP _{0.003 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.02 Mpa} mm ² /Kh	SP _{0.05 Mpa} mm ² /Kh
Kontula	0.6-0.7	77	1.5	1.25	0.25
Nummi-Pusula	0.7-0.8	15	4.5	3	0 (0.004)
	1.0-1.1	12.7	5	2.5	0.75
P-O pl 100+17	0.9	37	1.81		
P-O pl 114+80	0.7	47	1.61		
P-O pl 100+40	0.8	0.6	0.36		
Otaniemi	0.6	0.4	0.84		
Jyväskylä	1.5	30.2	4.75	3.75	3.25
	1.7	21.6	4.25	3.75	2.25
Jämsä	0.5-0.7	3.4	1.5	0.5	-
	1.2-1.5	2.1	3.0	1.5	0.5
Myrskylä	0.6-0.9	70.1	0.5	0.5	-
	1.3-1.5	67.9	1.5	0.5	-
Mäntyharju	0.7-0.9	2.4	2.5	0.5	-
	1.2-1.4	3.7	3.5	1.0	-
Piippola	0.6-0.7	2.6	2.0	1.5	0.75
	1.2-1.35	9.9	3.5	2.0	1.0
Tutkimuskohde			SP _{0.00175 Mpa}	SP _{0.0147 Mpa}	
Oulunsuu	1.2-1.4	10	5.6	3.33	
Kempele- Oulunsalo	1.2-1.4	28	9.6	7.3	


Laboratoriokokeet:
Palolahti et al./1993/

- 0...20 kPa
- 20...50 kPa
- ◆ 0...50 kPa

Friberg et al. /1989/

- ◇ 0...20 kPa
- ▲ 20...50 kPa
- △ 0...50 kPa

● Laboratory tests
(Jessberger et al.)

● In-situ tests
(Knutsson et al. , 1985)

△ Laboratory tests
(Knutsson et al. , 1985)

■ Mackenzie valley soils
(Penner and Ueda, 1978)

○ Calgary silt
(Konrad and Morgenstern, 1983)

□ La grande till
(Pare et al. , 1978)

△ Devon silt
(Konrad and Morgenstern, 1982)

Kuva 23. a-kertoimen (kaava 40) ja savipitoisuuden välinen vuorosuhde /Jessberger 1989/. Kuvaan on lisätty tutkimuksien Friberg et al. /1989/ ja Palolahti et al. /1993/ havainnot.

Taulukko 13. Taulukon 12 avulla kaavalla 40 lasketut a-kertoimet ja kaavalla 39 lasketut segregatiopotentiaalit 70 kPa kuormalla.

Tutkimus- kohde	Syvyys m	a-kerroin, labo- ratoriokokeiden mukaan, kaava 40 MPa ⁻¹			a-kerroin, savipitoi- suuden mukaan kuva 23, Mpa ⁻¹	SP _{0,07MPa} mm ² /Kh, a-kerroin laborato- rioko- keiden mukaan (ka.)	SP _{0,07MPa} mm ² /Kh a-kerroin savipitoi- suuden mukaan
		Kuormitusportaat σ ₁ ja σ ₂ : kPa 3-20 20-50 3-50					
Kontula	0.6-0.7	11	38	54	0-1.5	0.15	1.43
Nummi-Pusula	0.7-0.8	24	221	150	6-14	0.0007 *	2.3
	1.0-1.1	41	40	40	7-15	0.33	2.4
P-O pl 100+17	0.9				1-9	--	1.3
P-O pl 114+80	0.7				0-6	--	1.3
P-O pl 100+40	0.8				10-25	--	0.11
Otaniemi	0.6				10-30	--	0.22
Jyväskylä	1.5	14	5	8	3-10	2.6	3.1
	1.7	7	17	14	5-12	1.83	2.4
Jämsä	0.5-0.7	65					
	1.2-1.5	41	37	38			
Myrskylä	0.6-0.9	0					
	1.3-1.5	65					
Mäntyharju	0.7-0.9	95					
	1.2-1.4	74					
Piippola	0.6-0.7	17	23	21			
	1.2-1.3	33	23	27			
Oulunsuu	1.2-1.4	40			7-16	0.37	2.6
Kempele- Oulunsalo	1.2-1.4	21			3-10	2.3	6.2

* segregatiopotentiaalin arvo 0 on korvattu arvolla 0.004.

Routanousua laskettaessa tässä työssä on käytetty laboratoriotulosten perusteella laskettua α -kerrointa, milloin sellainen on saatavilla ja muulloin savipitoisuudesta määritettyä arvoa (taulukko 13).

Routarintamaa kuormittava kokonaiskuormitus saadaan kaavalla 41 /Chamberlain 1981/.

$$q = q_p + q_i \quad (41)$$

q on kokonaiskuorma, kPa
 q_p routarintaman yläpuolisten maamassojen kuormitus, kPa
 q_i imukuorma, kPa.

Routarintaman keskimääräisen syvyyden yläpuolisten maamassojen aiheuttama kuormitus saadaan kaavalla 42 /Nixon 1982/

$$q_{p,n} = \sigma_n = \sum_{k=1}^{n-1} (d_k \cdot \gamma_k + \frac{\Delta h_{s,k}}{1.09} \cdot \gamma_w) + \frac{d_n}{2} \cdot \gamma_n \quad (42)$$

$q_{p,n}$ on kerroksen n keskimääräistä roudan syvyyttä vastaava yläpuolisten maamassojen kuormitus, kPa
 γ_k kerroksen k tilavuuspaino, kN/m³
 $\Delta h_{s,k}$ kerrokseen k joutuneen veden aiheuttama routanousu, m
 γ_w veden tilavuuspaino, 9.8 kN/m³.
 $d_{k,n}$ kerroksen k ja n alkuperäinen paksuus, mm

Pohjavedenpinnan etäisyydestä ja roudan syvyydestä aiheutuva imukuormitus saadaan kaavalla 43 /Williams 1967/.

$$q_i = (H_1 - X_1) \cdot \gamma_w + (H_2 - X_2) \cdot \gamma_w \quad (43)$$

q_i on imukuormitus, kPa
 $H_{1,2}$ pohjavedenpinnan syvyydet alkuperäisestä maanpinnasta routaantumisjakson alussa ja lopussa, m
 $X_{1,2}$ routarintaman syvyys routaantumisjakson alussa ja lopussa, m

Taulukko 14. Kaavoilla 34 ja 35 lasketut sekä vuonna 1991 mitatut routanousut.

Tutkimuskohde	maa- laji	In-situ SP (Liite 11) mm ² /Kh	Routanousu kaavan 34 mukaan, mm	Routanou- su kaavan 35 mu- kaan, mm	Mitattu routanousu v. 1991 mm
Kontula	liSa	-	6	34	0, (34 v92)
Nummi-Pusula	saSi	2.27	24	31	67
P-O pl 100+17	laSa	-	25	38	--
P-O pl 114+80	laSa	-	29	52	--
P-O pl 100+40	siHk	-	1	28	--
Otaniemi	HkMr	-	1	14	--
Jyväskylä	saSi	4.02	106	69	93
Oulunsuu	hkSi	4.72	16	38	96
Kempele- Oulunsalo	laSa	2.27	150	119	80
Σ Virhe, mm			234	160	

Eri tavoin määritettyjä segregaatiopotentiaalin arvoja verrattaessa havaitaan, että Jessbergerin /1989/ esittämä α -kertoimen ja savipitoisuuden välisen vuorosuhteen avulla määritetty $SP_{0.07MPa}$ vastaa paremmin in situ havaintojen avulla määritettyjä segregaatiopotentiaalia kuin laboratoriokokeiden avulla määritetty $SP_{0.07MPa}$.

6.2 Tilastolliset menetelmät

Vähemmän vaativissa kohteissa tai alustavassa suunnittelussa voidaan vaativien ja kalliiden laboratoriokokeiden tilalla käyttää tilastollisia menetelmiä routivuuteen ja routanousuun liittyvien parametrien likimääräiseen arvioimiseen.

Kujala /1991/ esittää kaavojen 44,45,46 ja 47 mukaiset yhteydet routanousukokeessa määritetyille routanousunopeudelle, kokonaisroutanousulle, routanoususuhteelle ja segregatiopotentiaalille.

$$V_{24h} = 0.013 + 0.002 * w_{vol} + 0.785 * \alpha_{(T=-2.5^{\circ}C)} \quad (44)$$

$$\begin{aligned} h_{max}/H = & -0.013 + 0.003 * (\%<0.02mm) \\ & + 0.003 w_{vol} + 0.622 * \alpha_{(T=-2.5^{\circ}C)} \end{aligned} \quad (45)$$

$$h_{max} = -0.018 + 0.184 * w_{vol} + 53.224 * \alpha_{(T=-2.5^{\circ}C)} \quad (46)$$

$$SP = 0.726 + 0.034 * w_{vol} + 24.091 * \alpha_{(T=-2.5^{\circ}C)} \quad (47)$$

V_{24h}	on	routanousunopeus 24 h aikana, mm/h
h_{max}		kokonaisroutanousu routanousukokeessa, mm
h_{max}/H		routanoususuhde, -
SP		segregatiopotentiaali, mm ² /Kh
w_{vol}		tilavuusvesipitoisuus, %
$\alpha_{(T=-2.5^{\circ}C)}$		jäätymättömän veden määrä -2.5 asteessa C.
(%<0.02 mm)		seulan 0.02mm läpäisyprosentti %

Taulukossa 15 on esitetty edellisten kaavojen mukaan lasketut routanousua kuvaavien tekijöiden arvot. Jäätymättömän veden määrä on arvioitu Kujalan /1991/ aineiston perusteella (Liite 9).

Taulukko 15. Kaavoilla 44 ja 46 lasketut routanousunopeudet ja maksimi routanousut.

Tutkimuskohde	w_{vol} lähtötieto	$\alpha_{(T=2.5\text{ C})}$ liite 9d	V_{24h} , kaava 44 mm/h	h_{max} , kaava 46 mm
Kontula	63.3	0.142	0.28	21.5
Nummi-Pusula	43.1	0.064	0.15	11.0
P-O pl 100+17	40.4	0.014	0.10	8.2
P-O pl 114+80	47.1	0.014	0.12	9.4
P-O pl 100+40	36.1	0.0145	0.097	7.4
Otaniemi	13.6	0.088	0.11	7.2
Jyväskylä	30.7	0.148	0.19	13.5
Oulunsuu	24.0	0.039	0.09	6.5
Kempele- Oulunsalo	45.5	0.014	0.11	9.1

Kaavalla 48 lasketut pohjamaan routanousut eri kohteissa on esitetty taulukossa 16.

$$h = \frac{h_{max}}{H} * D' \quad (48)$$

h on routanousu, mm
 h_{max}/H routanoususuhte, -
D' roudan tunkeutumisvyvyys pohjamaahan, m

Chen /1989/ esittää kaavan 49 suhteellisen routanousun laskemiseksi. Kohteissa, joissa ei ole mitattu roudan syvyyttä, on roudan tunkeutumisvauhdiksi oletettu muista kohteista saatu keskimääräinen arvo, eli 0.9 cm /vrk. Pohjaveden oletetaan olevan metrin syvyydessä. Kohteittain saadut tulokset ovat taulukossa 16.

$$h_{\max}/H = 2.7 \cdot 10^{-7} \cdot w^{3.0203} \cdot \rho_d^{5.38384} \cdot V_f^{-1.2181} \cdot H_w^{-0.2219} \cdot I_p^{1.0892} \quad (49)$$

h_{\max}/H on routanoususuhte, -

w vesipitoisuus, p-%

ρ_d kuivairtitiheys, g/cm³

V_f roudan tunkeutumisnopeus, cm/vrk

H_w pohjaveden korkeusasema maanpinnalta, cm

I_p plastisuusluku, %

Taulukko 16. Kaavoilla 45 ja 49 lasketut ja havaitut routanoususuhteet sekä kaavalla 47 lasketut ja laboratoriossa määritetyt segregatiopotentiaalit ja vuonna 1991 mitatusta roudan syvyydestä kaavalla 48 lasketut maksimi routanousut.

Tutkimus- kohde	SP kaava 47 mm ² /Kh	SPo laborato- rio mm ² /Kh	h_{\max}/H kaava 45 -	h kaava 48 mm	h_{\max}/H kaava 49 -	h_{\max}/H havaittu
Kontula	6.7	1.5	0.58	238	1.98	-
Nummi-Pusula	3.7	4.5	0.36	180	0.32	0.20
P-O pl 100+17	2.4	1.81	0.38	144	0.50	-
P-O pl 114+80	2.7	1.61	0.38	277	1.20	-
P-O pl 100+40	2.3	0.36	0.12	94	0	-
Otaniemi	3.3	0.84	0.10	93	0	-
Jyväskylä	5.3	4.75	0.40	120	0	0.15-0.22
Oulunsuu	2.5	5.6	0.15	102	0	0.16
Kempele- Oulunsalo	2.6	9.6	0.36	216	0.75	0.12-0.21

Taulukossa 17 on esitetty routivuusluokitus kohteittain plastisuuskartan, hienoustekijän, segregatiopotentiaalin ja routanousunopeuden perusteella.

Taulukko 17. Routivuusluokitus lähteen /ISSMFE 1989/ mukaan.

Tutkimus- kohde	Plastisuus- kartta	Hienoustekijä R _f	SP ₀	Routanousu- nopeus
Kontula	lievästi routiva	erittäin routiva	keskink. routiva	erittäin routiva
Nummi-Pusula	-	erittäin routiva	erittäin routiva	keskink. routiva
P-O pl 100+17	keskink. routiva	erittäin routiva	keskink. routiva	keskink. routiva
P-O pl 114+80	lievästi routiva	erittäin routiva	keskink. routiva	keskink. routiva
P-O pl 100+40	-	lievästi routiva	routimaton	keskink. routiva
Otaniemi	-	routimaton	lievästi routiva	keskink. routiva
Jyväskylä	erittäin routiva	erittäin routiva	erittäin routiva	erittäin routiva
Oulunsuu	-	erittäin routiva	erittäin routiva	keskink. routiva
Kempele- Oulunsalo	keskink. routiva	erittäin routiva	erittäin routiva	keskink. routiva

7 TULOSTEN TARKASTELU

CBR-kokeen ja vesipitoisuuden välinen vuorosuhde

Kontulan lihavalla savella (liite 2) havaitaan selvä CBR-luvun pieneneminen ($R^2=0.61$), kun vesipitoisuus kasvaa näytteessä. Nummi-Pusulan savisella siltillä (liite 2) selitysaste, $R^2=0.72$, oli vielä parempi. Sekä Kontulan että Palojärvi-Olkkalan pl 100+17:n (liite 3) kohteissa havaitaan, että kuvaajissa, joissa on kaikki näytteet huomioitu, on paremmat selitysasteet. Paras selitysaste, $R^2=0.92$, saatiin Otaniemen rakennetuilla hiekkamoreeni näytteillä (liite 4). Tässä mielessä näytteiden rakentaminen onnistui hyvin. Huonoin selitysaste $R^2=0.07$ saatiin Palojärvi-Olkkalatien pl 100+40:n hiekalla (liite 4). Tähän on syynä se, että näytteen valmistelemisen koetta varten oli vaikeaa. Koestuspintaa ei aina saatu tasaiseksi johtuen hiekassa olleista ohuista juuririhmastoista.

Kuvaajassa, jossa on esitetty kaikki tutkitut näytteet (liite 5) havaitaan että selitysaste kuvaajalla, jossa ei ole huomioitu hiekkaa $R^2=0.72$, on parempi kuin kuvaajalla, joka ottaa huomioon kaikki näytteet $R^2=0.53$. Hiekan CBR-arvot ovat muiden maalajien arvoja selvästi korkeammat. CBR-kokeen käyttökelpoisuutta saattaa parantaa kenttä CBR-kokeen käyttöönotto.

Karkearakeisille materiaaleille optimivesipitoisuudessa tehty CBR-koe saattaa antaa poikkeuksellisen korkeita kantavuusarvoja (vrt. liite 5).

Kantavuusmoduulin määrittäminen eri menetelmillä

Mikäli verrataan tielaitoksen menetelmällä arvioituja /TVH 1985/ ja levykuormituskokeilla määritettyjä kantavuusmoduuleja, havaitaan, että ainoastaan Kontulan ja Nummi-Pusulan kohteiden kentällä mitatut moduulit ovat arvioituja pienemmät. Muissa kohteissa mitatut kantavuudet olivat Palojärvi-Olkkala pl 114+80 kohdetta lukuunottamatta arvioituja selvästi suuremmat sekä keväällä että kesällä.

Vaikka kaavojen 5 ja 6 /Orama 1993/ on esitetty kuvaavan vuorosuhdetta sulamisvaiheessa määritetyn CBR-luvun ja levykuormituskokeella saadun kantavuusmoduulin välillä, voitaisiin kaavoilla, tehtyjen kokeiden perusteella, kuvata myös yhteyttä luonnontilaisten ja vesiupotuksessa olleiden näytteiden koetulosten ja keväällä tehtyjen levykuormituskokeiden (sekä STINA-, että tavallisen levykuormituskokeen) välillä. Kaavat 3 ja 4 /Shell 1978/ kuvaavat luonnontilaisten sulien näytteiden CBR-kokeiden tulosten ja jaksollisen

kolmiaksiaalikokeen tulosten välistä vuorosuhdetta. Kaavat soveltuvat kuvan 11 perusteella kuvaamaan hyvin myös keväällä tehtyjen pudotuspainolaitteko-keiden tulosten sekä luonnontilaisten ja vesiupotuksessa olleiden näytteiden CBR-kokeiden tulosten välistä vuorosuhdetta. Tämä onkin ymmärrettävää, sillä pudotuspainolaite on luonteeltaan dynaaminen koestuslaite. Tällä hetkellä luotettavimpana kantavuuden määritysmenetelmänä on pidettävä levykuormituskoetta, johon nykyinen suunnittelukäytäntökin perustuu. Käyttökustannuksiltaan ja kokeen toistettavuuden kannalta edullisin menetelmä on pudotuspainokoe, mutta sen käyttö tien mitoituksessa ja kevätkantavuuden määrittämisessä edellyttää vielä kehitystyötä. Nykyisellään pudotuspainolaitteen käyttö kevätkantavuuden mittauksessa johtaa rakenteen alimitoitukseen.

Kevätkantavuuskerroin

Kevään kantavuuskatoon pohjamaassa vaikuttaa eniten maapohjan routivuus. Routivuuteen ja sen voimakkuuteen vaikuttavat lähinnä maalajin rakeisuus, vesipitoisuus ja maassa vallitseva jännitystila. Kevätkantavuuskerrointa laskettaessa kantavuusmoduulin määrittämiseen käytetään yleensä levykuormitus- tai pudotuspainolaitteistoa. Yhden havaintokauden perusteella kaavalla 7 saadaan aina kevätkantavuuskertoimeksi säätekijöistä riippuvia arvoja. Säätekijöitä ovat mm. maapohjaan vaikuttava pakkasmäärä, routaantumis- ja sulamisnopeus sekä sademäärä. Nämä tekijät sekä kuivatusolosuhteet vaikuttavat pohjamaan vesipitoisuuteen ja pohjavedenpinnan korkeusasemaan. Näinollen kevätkantavuuskerroin tulisi määrittää useamman kuin yhden vuoden mittausten perusteella.

Kuva 12 esittää segregaatiopotentiaalin ja n -eksponentin välistä vuorosuhdetta, kun kaavassa 11b on käytetty kokonaiskuormana vakioarvoa 40 kPa. Kuvan 13 murtoviivat kuvaavat vuorosuhdetta segregaatiopotentiaalin ja eksponentin n välillä, kun kaavassa 11b käytetään kokonaiskuormana tutkimuskohteittain erikseen laskettua arvoa. Kokonaiskuormana vakioarvoa 40 kPa käyttäen saadaan kaavalla 11a kevätkantavuuskertoimen arvoja, jotka vastaavat paremmin levykuormituskokeen tulosten perusteella määritettyjä arvoja.

Maalajin routimisherkkyyttä kuvaa hyvin segregaatiopotentiaali. Koska segregaatiopotentiaalin määrittäminen on suhteellisen kallista ja vaativaa, pyritään segregaatiopotentiaali arvioimaan helpommin määritettävissä olevan hienoustekijän avulla. Jessbergerin et al /1989/ mukaan segregaatiopotentiaalilla ja hienoustekijällä on kuvan 14 mukainen vuorosuhde. Tutkimusten Palolahti et al. /1993/ ja Saarelainen et Toivonen /1991/ sekä tämän tutkimuksen yhteydessä tehdyt laboratoriokokeet osoittavat samansuuntaista vuorosuhdetta. Kuvassa 15 olevat koepisteet (Friberg et al. /1989/) osoittavat,

että rakennetuilla näytteillä tulokset voivat erota kuvan 14 osoittamalta käyrältä. Koetulokset osoittavat pienempää segregatiopotentiaalin arvoa, vaikkakin kuvaajan muoto on samanlainen. Kuvassa 16 ei havaita samanlaista yhteyttä segregatiopotentiaalin ja hienoustekijän kanssa kuin kuvissa 14 ja 15. Tähän on ilmeisesti osasyynä erilainen koejärjestely ja laitteisto eri tutkimuslaitoksissa.

Kuvassa 19 voi nähdä kevätkantavuuskertoimen ja segregatiopotentiaalin välisen vuorosuhteen. Kuvaan on piirretty pienimmän neliösumman menetelmällä eksponenttinen kuvaaja. Todellisuudessa yhteys on kuitenkin lähempänä käsin piirrettyä käyrää, jolloin pienellä segregatiopotentiaalin arvolla kevätkantavuuskerroin lähenisi arvoa 0.8-1.0.

Roudan syvyys

Stefanin yhtälöllä 14 lasketuilla k-kertoimilla (taulukko 9) ei havaita selvää riippuvuutta maalajista. Tätä kertoo myös se, että maan lämmönjohtavuutta kuvaavissa lausekkeissa, esimerkiksi Kerstenin yhtälöissä, ei ole rakeisuuteen liittyviä termejä.

Stefanin yhtälöllä ja muunnetulla Berggrenin yhtälöllä lasketut roudan syvyydet eivät huomioi rakennekerrosta. Maapohjan kerroksellisuuden huomioonottaminen ei antanut kuitenkaan todellista roudan syvyyttä lähempiä tuloksia, koska kaikista tutkimuskohteista ei ollut saatavissa tarvittavia parametreja, kuten rakennekerroksen vesipitoisuus ja tilavuuspaino. Paras vastaavuus roudan syvyyttä laskettaessa saatiin Stefanin yhtälöllä, kun tutkimuskohteiden maalajien k-kerroin valittiin McCormickin /1993/ tutkimustulosten perusteella.

Routanousu

Segregatiopotentiaali on kaavan 39 mukaisesti riippuvainen kokonaiskuormituksesta. Jessbergerin /1989/ mukaan kaavassa oleva a-kerroin olisi kuvan 23 mukaisessa vuorosuhteessa savipitoisuuden kanssa. Tutkimusten Palolahti et al. /1993/ ja Friberg et al. /1989/ yhteydessä tehtyjen routanousukokeiden tulosten mukaan (kuva 23) vuorosuhde ei ole niin yksiselitteinen.

Kaavan 34 /Saarelainen 1992/ mukaan homogeenisen maan routanousu voidaan arvioida segregatiopotentiaalin, pakkasmäärän ja k-kertoimen avulla (kaava 15). Tällä kaavalla lasketut routanousut olivat joko selvästi suurempia tai selvästi pienempiä kuin mitatut. Ainoastaan Jyväskylän kohteen laskettu routanousu vastasi mitattua. Kerroksellisen maan menetelmä routanousun laskemiseksi kuvasi todellista tilannetta parhaiten, vaikka suuria poikkeamia esiintyi. Syitä poikkeamiin oli esimerkiksi vajavaiset tiedot pohjaveden sijainnista, ja kokonaiskuormitusta vastaavan segregatiopotentiaalin

määrittämissä olevat virhemahdollisuudet (vrt. kerroin a).

Tilastolliset menetelmät

Tilastollisten menetelmien tulokset poikkeavat merkittävästi muilla menetelmillä saaduista tuloksista ja havainnoista. Mikäli tilastollisia menetelmiä halutaan käyttää luotettavammin tulisi aineiston olla kattavampaa kuin tässä käytetty. Esimerkiksi Oulunsalon ja Kempele-Oulunsuun kohteissa maalajia edustavat parametrit oli valittava 2-3 koetuloksen perusteella.

Kujalan maksimiroutanoususuhteen (kaava 48) avulla lasketut routanousut olivat Kontulan, Nummi-Pusulan ja Kempele-Oulunsalon kohteissa noin 3..7 kertaisia havaintoihin verrattuna. Ero johtunee laboratoriokoemenettelystä, joka korostanee liiaksi hienorakeisten maalajien routivuuden voimakkuutta.

Kujalan /1991/ tulosten perusteella (kaava 45) laskettu routanoususuhte oli noin kaksinkertainen sekä Chenin /1988/ tulosten perusteella (kaava 49) laskettu noin nelinkertainen verrattuna neljässä eri tutkimuskohteessa havaittuun routanoususuhteeseen.

Taulukon 17 routivuusluokituksen tulokset vaihtelevat. Routanousunopeus on laskettu Kujalan /1991/ aineiston perusteella.

Mikäli tilastollisia menetelmiä halutaan käyttää, tulee ne kalibroida käyttöolosuhteissa.

8 TUTKIMUSTARVE

Routivuuden ja kevätkantavuuden arvioinnissa käytettävät likimääräismenettelmät /Tiel 1990, Friberg & Slunga 1989/ toimivat kohtuullisella tarkkuudella. Menetelmien antamia tuloksia on kuitenkin syytä tarkentaa perusteellisemmilla tutkimuksilla silloin, kun rakenteiden vaurioituminen saattaa aiheuttaa merkittävää haittaa rakenteiden toiminnalle.

Tutkimustarvetta on ilmennyt routivuuden arvioinnissa käytettävän routanousukokeen koejärjestelyn ja näytteen valmistuksen osalta. Koejärjestelyn ja näytteen valmistuksen standardisoimisen tarve on ilmeinen, koska tutkimuksen aikana on todettu huomattavia poikkeamia eri laitosten ja lähteiden raportointien koetulosten välillä. Kokeen standardisoiminen tarkoittaa sitä, että kokeen tuloksena saadaan maalajin segregatiopotentiaali määritettynä aina samanlaisissa laboratorio-olosuhteissa. Tällöin koetulokset (maalajin routivuudet) ovat vertailukelpoisia keskenään. Toisaalta routanousukoe tulee pyrkiä tekemään mahdollisimman hyvin kenttäolosuhteita vastaavalla tavalla, joten laboratorio-olosuhteet standardikokeessa tulisi saada vastaamaan tyypillisiä kenttäolosuhteita niin pitkälle kuin mahdollista.

Tierakenteen ja pohjamaan kevätkantavuutta mitataan usein levykuormituskokeella ja pudotuspainolaitteella. Näiden mittausmenetelmien teko-ohjeet ja mittausmenetelmien tarkennukset sekä kehittäminen ovat nousseet päällimmäiseksi. Levykuormituskokeen yhteydessä levyn kokonaispainuma pohjamaahan tulee rajoittaa 1...1,5 mm:iin, jolloin vältetään maapohjan murtumiselta. Pudotuspainolaite on osoittautunut epäluotettavaksi mittausmenetelmäksi kevätkantavuutta mitattaessa. Laitetta voidaan käyttää vasta, kun koko tierakenne on sula. Tulkintavaikeuksia syntyy myös pohjamaan ollessa pehmeä ja veden kyllästämä. Tulosten luotettavuutta voitaneen parantaa kehittyneemmillä laskentaohjelmilla, mutta se edellyttää vielä kehitystyötä.

Alusrakenteen kantavuusluokituksessa /Tiel 1990/ heikoin luokka on G, jossa kantavuusmoduuli on 5 MN/m^2 . Kantavuusmoduulille ei ole ilmoitettu vaihteluväliä. Luokkaan G kuuluvat maalajit lieju, turve ja pehmeä savi sekä märkä siltti ja silttimoreeni. Tutkimuksessa on kuitenkin havaittu kantavuusmoduulin ko. maalajeilla olevan vaihdellen $2..10 \text{ MN/m}^2$. Näin ollen olisikin perusteltua kehittää luokitusta ja laajentaa luokan G maalajien kantavuusmoduulien vaihteluväliksi $1...5 \text{ MN/m}^2$.

Erilaisilla kenttämittausmenetelmillä määritetyt pohjamaan kantavuusmoduulit vastaavat toisiaan sitä paremmin, mitä lähempänä menetelmien kuormitusajat ovat toisiaan. Tuloksiin vaikuttavat lisäksi monet muut tekijät mm. kuormituksen luonne ja mitattavan kohteen rakenne. Yksittäisiä tuloksia verratessa erot saattavat olla huomattavia, mutta tilastollisesti saat- taan olla perusteltua käyttää eri menetelmiä rinnakkain esimerkiksi inventointimittauksissa. Erilaisilla menetelmillä määritettyjen kantavuusmoduulien välille ei ole pystytty luomaan luotettavaa yhteyttä. Toisaalta kaikki tierakenteen mitoitusten menetelmät /TVH 1985, Tiel 1990/ perustuvat Odemarkin mitoitustaavaan, jossa lähtötietoina tarvitaan aina pohjamaan staattinen kantavuusmoduuli. Uusimpina mitoitusten menetelminä on kehitelty kimmoteo-

riaan pohjautuvia numeerisia laskentamenetelmiä, jotka käyttävät mm. pudotuspainolaitteen tuloksia hyväkseen. Uusien menetelmien vastaavuus entiseen käytäntöön ja kelpoisuus toteutuneissa rakenteissa olisi tutkittava.

Laboratoriossa tehtävä CBR-koe on epäsuora kantavuuden mittausmenetelmä. CBR-luku voidaan muuntaa vastaamaan kantavuusmoduulia erilaisin vuorosuhtein. Tutkimuksen yhteydessä saaduissa tuloksissa on kuitenkin suurta hajontaa ja havaintojen lukumäärä on pieni. Koemenetelmä on nopea ja helppo tehdä sekä tulos on nopeasti hyödynnettävissä. Tuloksen luotettavuutta voidaan lisätä huolellisella kokeen tekemisellä sekä näytteen valmistuksella. Häiriintymätön joko vesiupotuksessa ollut tai luonnontilainen sula näyte on suositeltavin. Sulatus-jäädytys-jakson läpikäyneiden näytteiden CBR-luvuissa oli runsaasti hajontaa, mikä saattoi johtua näytteiden häiriintymisestä jäädätyksen ja sulatuksen yhteydessä.

Pohjatutkimustuloksiin perustuvia kantavuuden määritysmahdollisuuksia tulisi selvittää. Mielenkiintoisia mahdollisuuksia saattaisi olla esimerkiksi kevyen lyöntikairan käyttö karkeissa materiaaleissa ja puristinkairan tai kenttä CBR-kokeen käyttö pehmeissä maalajeissa. Kenttä CBR-kokeen tulosten käytöstä kantavuuden määrittämiseen on hyviä kokemuksia /Arm 1991/.

Jaksollisia kolmiaksiaalikokeita tulisi tehdä tutkituille maalajeille luonnontilannetta vastaavissa sulissa sekä sulavissa olosuhteissa. Suositeltavin näyte on luonnontilainen, häiriintymätön näyte, jonka kyllästysaste on lähellä maksimiaan. Routimisen vaikutusta arvioitaessa routanousukoe-laitteisto soveltuu käytettäväksi näytteen jäädäyttämiseen ja jäädäytys-sulatusjaksojen lukumäärä voisi olla 1...3. Myös pohjamaiden jännitystilän vaikutukset tulisi selvittää. STINA-projektissa /1977/ käytetty staattinen pystyjännitys oli 20 kPa ja sivupaine oli 10 kPa. Dynaaminen pystykuormitus oli 5, 10, 25 ja 50 kPa ja syklien lukumäärä ko. portaalla oli 20.000. Suomalaisia tutkimusvalmiuksia tulisi kehittää etenkin pehmeiden pohjamaiden tutkimiseen sopiviksi.

CBR-kokeen (\varnothing 150mm, h 125mm) ja jaksollisen kolmiaksiaalikokeen (\varnothing 150mm, h 350mm) näytekoiko aiheuttaa käytännön ongelmia, koska kokeet tulisi tehdä häiriintymättömillä pohjamaanäytteillä. Tällöin ainoa näytteenotomenetelmä on kallis ja hankala koekuoppa. Menetelmien käyttökelpoisuutta voidaan kehittää esimerkiksi paljastamalla pohjamaan pinta poraamalla ja tekemällä CBR-koe kenttälaitteistolla tai modifioidulla laboratorio-laitteistolla.

Kevätkantavuuden parantamiseen ja roudan haittavaikutusten estämiseen soveltuvia menetelmiä ovat mm. riittävä rakennepaksuus, siirtymäkiilat, erilaiset vahvisteet, lämmöneristeet, ojitus ja materiaalivalinnat. Routamitoituksen lähtökohtia ovat mm. tierakenteelle asetetut kantavuus- ja tasaisuustavoitteet sekä sallittu routanousu /Orama 1987/. Parannusmenetelmien ja eristemateriaalien pitkäaikaiskestävyys ja niiden vaikutus tierakenteen kantavuuteen tien suunnitellulla kestoikällä vaatii lisätutkimuksia.

Suunnittelua varten olisi määritettävä mitoittava pakkasmäärä, sallitut muodonmuutokset erilaisten rakenteiden yhteydessä jne., jotta ne toimisivat yksiselitteisinä mitoituskriteereinä.

Kevätkantavuuden arviointiin käytetty laskentamalli on osoittautunut lupaavaksi, mutta ongelman luonteen ja käytettävissä olleiden resurssien rajallisuuden vuoksi tulokset eivät ole vieläkään kaiken kattavia. Tutkittavia ongelmia ovat edelleen mm. parametrien riippuvuus maan ominaisuuksista, maan todellinen jännitystila sekä huokospaineen arviointi ja mittausmenetelmä kuormitustilanteessa.

Tutkimukset voidaan suurelta osalta tehdä laboratoriossa ja kenttämittauksin, mutta osa vaatii hyvin instrumentoituja koerakennuskohteita.

9 YHTEENVETO

Tutkimus tehtiin tielaitoksen tilauksesta. Siinä käytettiin hyväksi edellisissä tutkimuksissa (STINA 1977, Jämsä 1985 ja Palolahti et al. 1993) saatuja tuloksia. Lisäksi valittiin näissä tutkimuksissa olleista kohteista kuusi jatkotutkimuskohdetta, joista otettiin maanäytteitä luokitus-, CBR- ja routanousukokeita varten. CBR-kokeita tehtiin luonnontilaisille ja vesiupotuksessa 4 vuorokautta olleille näytteille. Routanousukokeet tehtiin VTT:ssa niiden neljän tutkimuskohteen maanäytteille, joista ei ollut aikaisempia tutkimustuloksia käytettävissä.

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella pohjamaan kevätkantavuusmoduulin määrittämistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä, testata edellisessä tutkimuksessa kehitettyä jännitystilaan perustuvan mallin toimivuutta kevätkantavuuskertoimen määrittämiseksi sekä tarkentaa mallin parametrien määrittämistä. Lisäksi tavoitteena oli CBR-kokeen käyttömahdollisuuksien tutkiminen sekä roudan syvyyden ja routanousun arviointiin käytettyjen menetelmien kelpoisuuden tarkastelu.

CBR-kokeiden tulosten ja vesipitoisuuksien välisen vuorosuhteen selityssasteet olivat hienorakeisilla maalajeilla ja hiekkamoreenilla parempia kuin hiekalla. Hiekalla CBR-luvut olivat selvästi korkeampia kuin muilla näytteillä, joten vuorosuhde näyttää riippuvan myös maalajista. Karkearakeisilla materiaaleille optimivesipitoisuudessa tehty CBR-koe saattaa antaa poikkeuksellisen korkeita kantavuusarvoja (vrt. liite 5).

Dynaaminen kantavuusmoduuli arvioitiin kaavojen 3 ja 4 avulla luonnollisten ja vesiupotuksessa säilytettyjen näytteiden CBR-kokeen tuloksen perusteella kohtalaisella tarkkuudella. Vastaavasti staattinen kantavuusmoduuli arvioitiin kaavojen 5 ja 6 avulla, mutta tarkkuus ei ollut aivan yhtä hyvä. CBR-kokeen käyttökelpoisuutta saattaa parantaa kenttä CBR-kokeen käyttöönotto.

Tielaitoksen rakenteen parantamislunonnoksessa ehdotetaan tien pinnalta mitattu kantavuus kerrottavaksi kevätkantavuuskertoimella, jonka suuruus on sorateilla 0,4...0,8, AB-teillä 0,8...1,0 ja kevyesti parannettavilla päällystetyillä teillä 0,6...0,8. Kun pohjamaan kevätkantavuuskerroin lasketaan mitatuista levykuormituskokeen tuloksista, niin laskentatulokset vaihtelevat mittausajan kohtien ja sääolosuhteiden mukaan. Luotettavampaan tulokseen päästäisiin, jos saatavilla olisi useamman vuoden aikana mitattuja tuloksia. Lisäksi aikaisempien tutkimusten ja tämän tutkimuksen tuloksien perusteella kevätkantavuuskerroin voidaan likimääräisesti arvioida myös maapohjassa vallitsevaan jännitystilaan perustuvan mallin avulla. Mallin toimivuutta eri olosuhteissa tulisi kuitenkin vielä tutkia. On huomattava, että sorateiden ja yleensä ohutrakenteisten tierakenteiden kantavuus riippuu lähes yksinomaan

pohjamaan kantavuudesta.

Roudan syvyys ja routanousu saadaan arvioitua maan lämpötekniisiin ominaisuuksiin ja pakkasmäärään perustuvilla menetelmillä. Roudan syvyys saatiin arvioitua parhaiten Stefanin yhtälön avulla. Routanousu arvioitiin parhaiten maan kerroksellisuuden huomioivalla laskentatavalla, joskin tulokset poikkesivat mitatuista.

Tilastollisia menetelmiä pyritään käyttämään alustavassa ja vähemmän tarkkuutta vaativassa suunnittelussa routanousuun liittyvien parametrien likimääräiseen arvioimiseen. Tilastollisilla menetelmillä tehdyt routasuureiden arvioinnit antoivat ristiriitaisia tuloksia. Tilastolliset menetelmät tulisi kalibroida käyttöolosuhteissa.

KIRJALLISUUS

AASHTO, 1986. AASHTO guide for design of pavements structures. American association of state highway and transportation officials, Washington, D.C.

Andersland, O., & Anderson, D., 1978. Geotechnical engineering for cold regions. U.S.A. 566 s.

Arm, M., 1991. Finkorniga jordmaterials egenskaper. Linköping, Statens väg- och trafikinstitut, Notat nr V 147. 41 s.

Chamberlain, E. J., 1981. A statistical evaluation of soil and climatic parameters affecting the change in pavement deflection during thawing of subgrades. Hanover N.H., U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, report 81-15. 10 s.

Chamberlain, E. J., 1987. A freeze-thaw test to determine the frost susceptibility of soils. Hanover N.H., U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, CRREL, report 87-1. 90 s.

Chen, X., 1989. Current development on frost susceptibility prediction of soils in P.R. China. In: VTT Symposium 95, Saariselkä 13-15.3.1989, Frost in geotechnical engineering, Espoo, vol 2. s. 481-490.

Culley, R.W., 1967. Frost penetration in Saskatchewan pavements. Saskatchewan department of highways technical report 6.

Friberg, P., & Slunga, E., 1989. Maalajien routivuuskriteerien kehittäminen. Diplomityö. Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu, Rakennetekniikan laitos, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 130 s. + 12 liit.

Gustavsson, H., 1991. Roudan sulamisen vaikutus maakerroksen kevätkantavuuteen. Diplomityö. Otaniemi, Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Pohjarakennus ja maamekaniikka. 84 s.

Helander, R., 1985. Maan terminen analyysi elementti menetelmällä. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, rakennusinsinööriosasto, Otaniemi. 68 s.

Hentilä, V., 1994. Roudan vaikutusten mallintaminen. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, rakennetekniikan laitos, pohjarakennus ja maamekaniikka, Otaniemi (Julkaisematon).

ISSMFE Technical Committee on frost, TC8, 1989. Work report 1985-1989. In: VTT Symposium 94, Saariselkä 13-15.3.1989, Frost in geotechnical engineering, Espoo, vol 1. s. 15-47.

ISSMFE Technical Committee on frost, TC8, 1993. Work report 1990-1993. Recommended tests for predicting the thaw weakening of subgrade soil. In: Proc. 2nd International Symposium, (toim.) Phukan, A., Frost in geotechnical engineering, 28.6.-1.7.1993, Anchorage, Alaska, U.S.A. s. 159-172.

Jessberger, H., 1974. Vergleichende Beurteilung der gebräuchlichen Frostkriterien für Frostschutz-Kies-Sande anhand der Originalveröffentlichungen. Bochum. 242 s.

Jessberger, H., 1987. Merkblatt für die Verhütung von Frostschäden in Strassen. Entwurf 03/87. Esipainos. 63 s.

Jessberger, H.L., & Jagow, R., 1989. Determination of frost susceptibility of soils. VTT Symposium 95, Frost in geotechnical engineering, Saariselkä, 13-15.3.1989, Vol 2. s. 449-470.

Jämsä, H., 1985. Pohjamaan kantavuus tierakenteen alla. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tie- ja liikennelaboratorio, Tiedotteita 526. 33 s.

Knutsson et al. 1985. Analysis of large scale laboratory in situ frost heave tests. 4th Int.Symp. on Ground Freezing. Sapporo. s. 65-70.

Konrad, J-M., 1980. Frost heave mechanics. Ph.D.Thesis. University of Alberta. 472 s.

Konrad, J-M., 1990. Segregation potential-pressure-salinity relationships near thermal steady state for a clayey silt. In: Can. Geotech. J., Vol 27. s. 203-215.

Konrad, J-M., & Morgenstern, N.R., 1980. A mechanistic theory of ice lense formation in fine-grained soils. In: Can. Geotech. J., Vol 17, s. 473-486.

Konrad, J-M., & Morgenstern, N.R., 1981. The segregation potential of a freezing soil. In: Can. Geotech. J., Vol 18, s. 482-491.

Konrad, J-M., & Morgenster, N.R., 1982. Prediction of frost heave in the laboratory during transient freezing. In: Can. Geotech. J., Vol 19, s. 250-259.

Kujala, K., 1991. Factors affecting frost susceptibility and heaving pressure in soils. Oulu, Acta Universitatis Ouluensis, series C, technica 58. 99 s.

Liimatta, L., et al. 1989. Pudotuspainolaitteen käyttö tien rakenteellisen toiminnan arvioinnissa ja parantamistarpeen suunnittelussa. Oulu, Oulun Yliopiston tie- ja liikennetekniikan laboratorion julkaisuja 2. 85 s.

McCormick, G., 1993. Frost penetration beneath cleared pavements. In: Proc. 2nd International Symposium, (toim.) Phukan, A., Frost in geotechnical engineering, 28.6.-1.7.1993, Anchorage, Alaska, U.S.A. s. 117-126.

Miller, R.D., 1972. Freezing and heaving of saturated and unsaturated soils. Highway research record 393. s. 1-11.

Mäkelä, H., Petäjä, J. & Kivikoski, H. 1986. Routasuojaus ja maan lämpökapasiteetti. In: Vähäaho, I. (toim.) Pohjarakenteet, RIL 166. Helsinki, Suomen rakennusinsinöörien liitto. s. 381 - 406.

Nixon, J., 1982. Field frost heave predictions using the segregation potential concept. Can. Geotech. J., Vol 19. s. 526-529.

Orama, R., 1982. Tielaitos, Geopalvelukeskus, luentomoniste, julkaisematon.

Orama, R., 1987. Tiealueiden routasuojaus. In: routa ja rakentaminen, SGY ry, Helsinki. s. 137-157.

Orama, R., 1993. Tielaitos, Geokeskus. Henkilökohtainen tiedonanto.

Palolahti, A., Slunga, E., Saarelainen, S., & Orama, R., 1993. Sulavan maan kantavuus. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto, Pohjarakennus ja maamekaniikka, julkaisu 1. 99 s.

Phukan, A. 1985. Frozen ground engineering. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 336 s.

Rieke et al. 1983. The role of specific surface area and related index properties in the frost heave susceptibility of soils. 4th Int.Conf.of PF. s. 1066-1071.

Saarelainen, S. 1990. Tien alusrakenteen kevätkantavuuden mallintaminen. Espoo, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Geotekniikan laboratorio, luonnos.

Saarelainen, S., & Toivonen, T., 1991. Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P-Virala. Rakennustekniikka 1/1991. s. 13-18.

Saarelainen, S., 1992. Modelling frost heaving and frost penetration in soils at some observation sites in Finland. The SSR model. Espoo, Technical Research Centre of Finland, Publications 95. 120 s.

Shell 1978. Shell Pavement Design Manual. London.

SNV 670 320a. 1973. CBR-Versuche im Laboratorium. Schweizerische Normenvereinigung (SNV). 10 s.

SNV 670 316. 1975. CBR-Penetrometer, Feldversuch. 3 s.

Stefan, J., 1890. Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere über die Eisbildung im Polarmeere, vol XCVIII, no IIa. Wien. s. 965-983.

STINA 1977:3. Samarbetsprojekt för tillämping i Norden av AASHO-undersökning. Slutrapport, teknisk del. Oslo, Nordiska ministerrådets sekretariat. 203 s.

Talonrakennuksen routasuojausohjeet, 1987. Rakentajain kustannus Oy, Helsinki. 95 s.

Tiel, 1990. Laadunvalvontaohjeet, Alusrakenne ja päällysrakenteen sitomattomat kerrokset. Tielaitos, Tiehallitus, Geopalvelukeskus, TIEL 732816. 76 s.

Tholén, O., 1980. Falling weight deflectometer - A device for bearing capacity measurement: properties and performance. Stockholm, Sweden. Department of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Bulletin 1980:1. 113 s.

TVH 1985. Teiden suunnittelu, kansio B, TVL:n ohjeet, osa IV. Helsinki, Tie- ja vesirakennushallitus, Tiensuunnittelutoimisto.

Williams, P.J., 1967. Properties and behaviour of freezing soils. Norges geotekniske institutt. Publication Nr. 72. Oslo. 119 s.

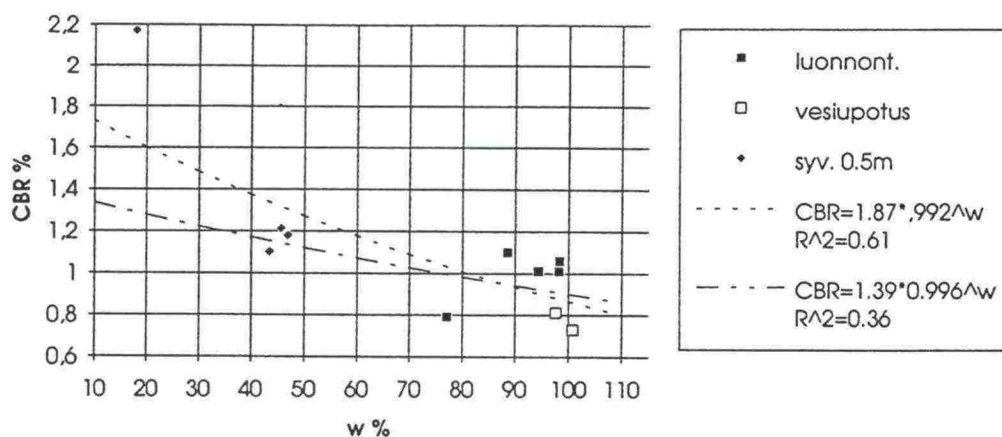
LIITTEET

1. Laboratorio- ja CBR-kokeiden tulokset
2. CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen, Kontula ja Nummi-Pusula
3. CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen, P-O pl 100+17 ja 114+80
4. CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen, P-O pl 100+40 ja Otaniemi
5. CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen, kaikki kohteet
5. CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen /Orama 1982/
6. Lämmönjohtavuudet kuivatilavuuspainon ja vesipitoisuuden suhteen
7. Pakkasmäärät, roudan syvyydet ja k-kertoimen arvot Kanadan lentokentillä
8. Maaprofiilit Kanadan lentokentillä sekä pakkasmäärät, roudan syvyydet ja k-kertoimen arvot Saskatchewan valtateilla.
- 9a. Kujalan koekappaleiden rakeisuus ja ominaispinta-ala
- 9b. Jäätymättömän veden määrä
- 9c. Routivuustekijät
10. Laboratorio ja kenttä CBR-kokeen tulokset vesipitoisuuden suhteen
11. Segregaatiopotentiaalin määrittäminen in situ havainnoista /Friberg et al. 1989/

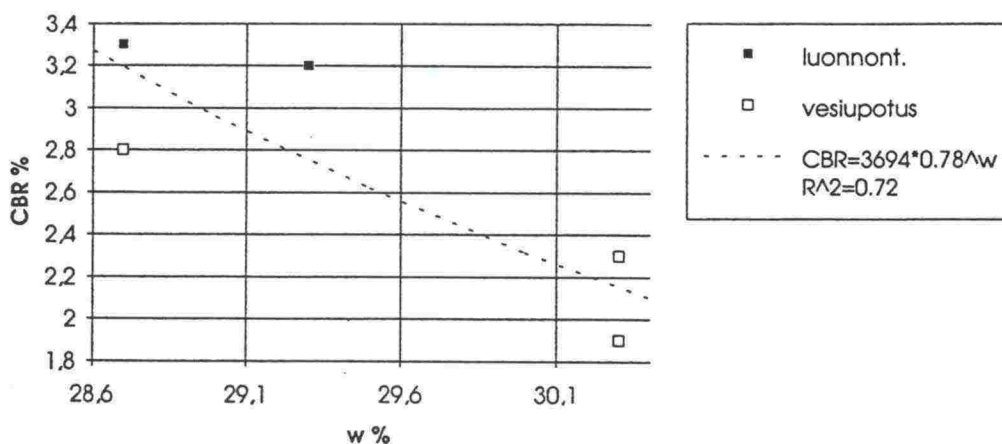
Laboratorio- ja CBR-kokeiden tulokset.

	Kontula	Nummi- Pusula *4	P-O pl 100+17	P-O pl 114+80	P-O pl 100+40	Otaniemi
Syvyys , m	0,75	1,0-1,2	0,9	0,7	0,8	0,6
Maalaji	liSa	saSi	laSa , kk	laSa	siHk	HkMr
savipitoisuus %	81,5	15	37	47	0,6	0,4
# < 0.02 mm %	93	70	88	80	3,8	7
# < 0.074 mm %	98,2	99,6	99,8	98,6	50,9	30
humus %	0,55	0,83	0	1,34	0,5	0,5
luonnontilainen w %	99,4	28,0-31,1	23,8	33,2	21,5	8,9
Wvol	75,8	41,3-44,8	40,4	47,1	36,1	13,6
irtotiheys t/m3	1,52	1,89	2,1	1,89	2,04	1,66
kuivairtotiheys t/m3	0,76	1,48	1,7	1,42	1,68	1,52
kiintotiheys t/m3	2,78	2,68	2,73	2,73	2,68	2,68
huokoisuus n %	73	45	37,9	48	37,4	43,1
huokosluku e	2,65	0,82	0,6	0,92	0,6	0,76
Kyllästysaste Sr %	1	0,92	1	0,98	0,97	0,31
WI %	82,8	29,5-33,4	36,9	58,5	20 *6	19,5 *6
Wp %	30,5	25,0-22,0	23,3	27,6	---	---
lp %	52,3	4,5-11,4	13,6	30,9	---	---
IL	1,3	0,7	0,03	0,18	---	---
Kartiokokeen hie- nousluku F %	84,2	31,1-37,3	39,5	61,5	26,4-28,4*5	25,3 *6
Kapill.nousukork. cm	---	---	---	---	95	195
Hienoustekijä Rf %	96,7	50,7-44,7	100	80	3 *6	2,05 *6
SPo , mm2/Kh	1,5	4,5	1,81	1,61	0,36	0,84
CBR-kokeet :						
CBR % / w %						
luonnontilainen	1,1/88,7	3,3/28,7	22,5/20,3	3,4/35,7	31,6/23,0	10,4/10,1
	1,01/98,2	3,2/29,3		4,1/33,1	22,6/23,1	8,8/10,2
	1,01/94,4			4,2/30,2	23,0/22,1	
	1,06/98,3					
	0,79/77,1*1					
vesiupotus	0,73/100,8	1,9/30,3	2,3/30,0	4,3/34,5	19,1/22,8	5,2/15,1
	0,81/97,6	2,3/30,3	3,8/27,0	3,9/33,7	22,5/23,8	5,1/15,8
		2,8/28,7*2	2,7/26,1	4,5/30,9	17,9/23,8	
syv 0.5 ositt. kuivak.	1,1/43,5					
	1,2/45,7					
	1,2/46,9					
	2,2/18*3					
*1: näytteen kork 150mm , sijainti eri, kts luku 4						
*2: syvyys 1,2m						
*3: koestettu edellisen näytteen kuivakuoripuoli						
*4: syvyys 1.0m / 1.2m , jos yksi arvo, niin syvyys 1.0m						
*5: # < 0.074 - # < 0.5						
*6: # < 0.074						

Kontula liSa

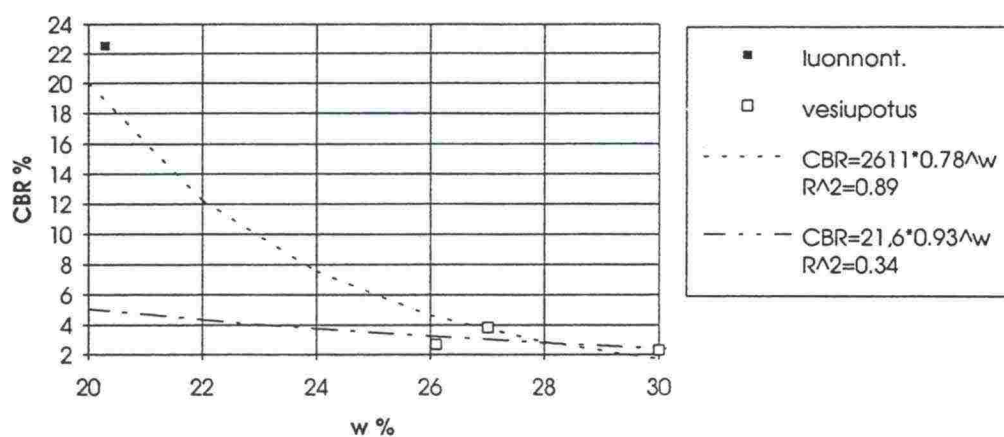


Nummi-Pusula saSi

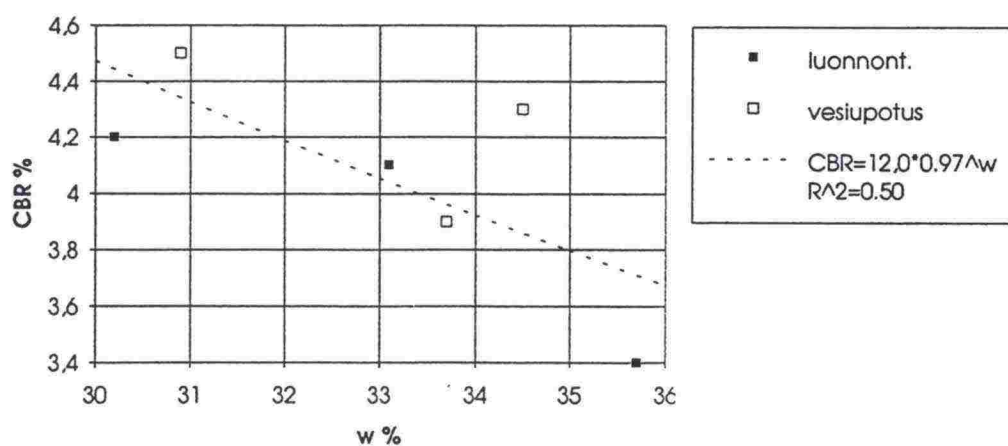


Vesipitoisuuden ja CBR-kokeiden tulosten välinen vuorosuhde.

Palojärvi-Oikkala pl 100+17 laSa, kk

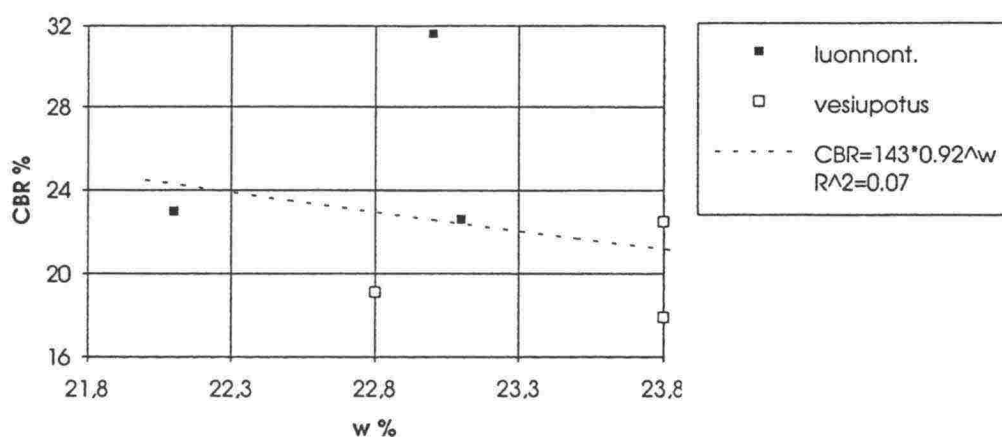


Palojärvi-Oikkala pl 114+80 laSa

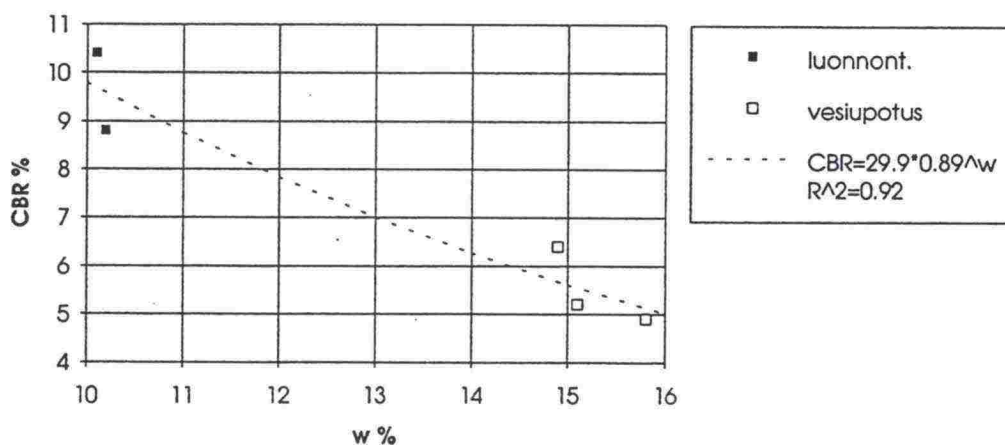


Vesipitoisuuden ja CBR-kokeiden tulosten välinen vuorosuhde.

Palojärvi-Olkkala pl 100+40 Hk

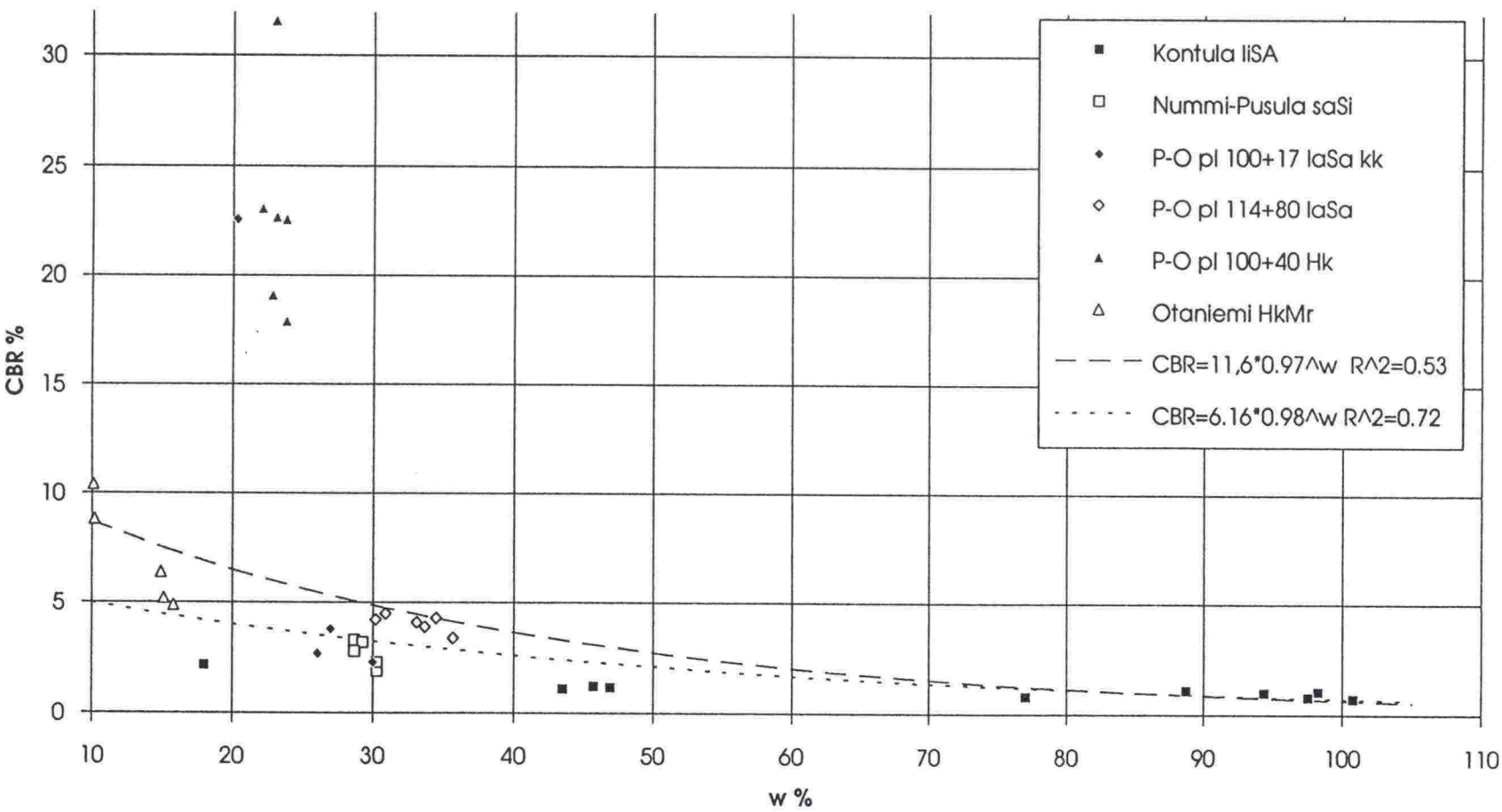


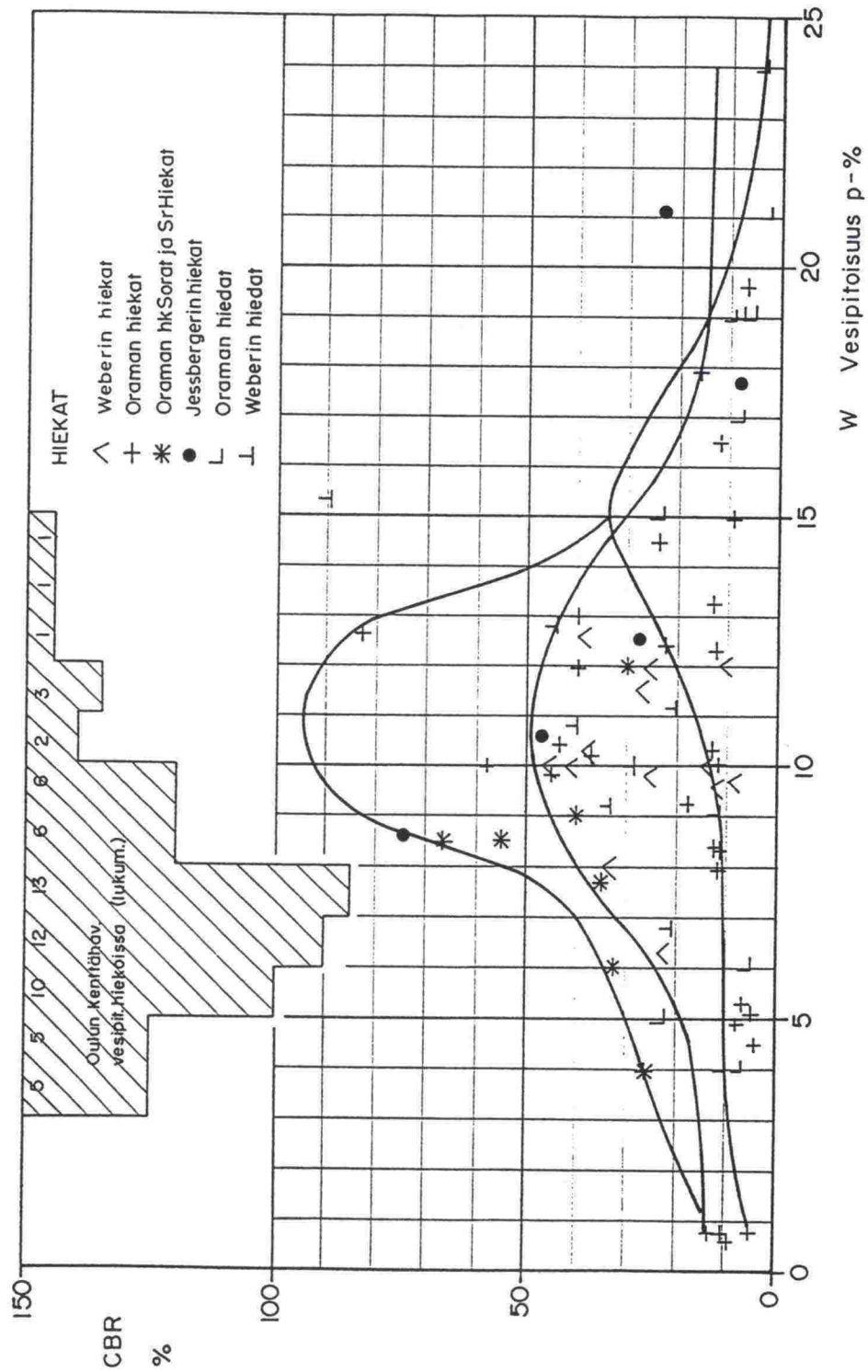
Otaniemi HkMr



Vesipitoisuuden ja CBR-kokeiden tulosten välinen vuorosuhde.

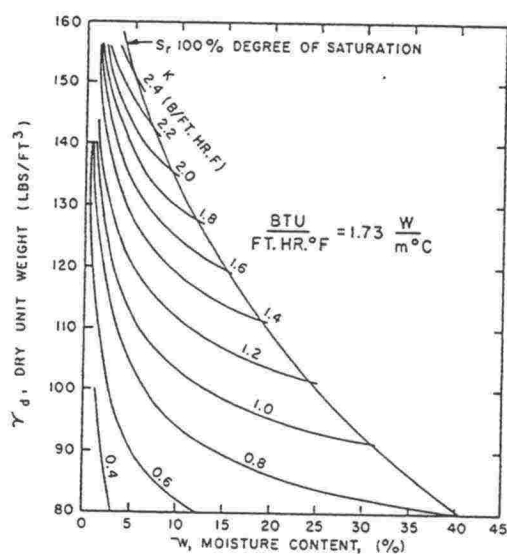
Kaikki kohteet



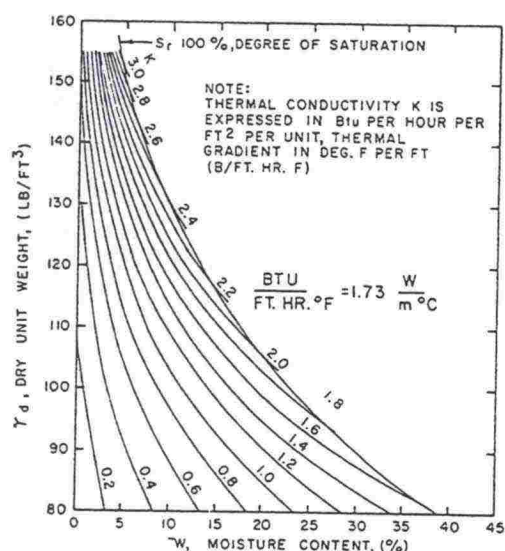


14.6.82/RO

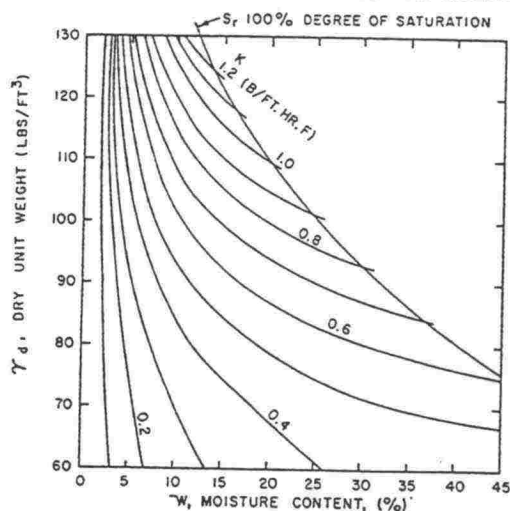
Karkearakeisten materiaalien CBR-luku vesipitoisuuden suhteen sekä vesipitoisuuksien jakauma kenttäkohteissa /Orama 1982/.



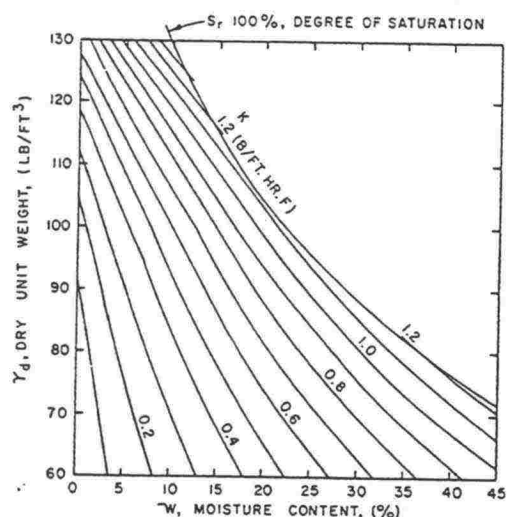
(A) COARSE GRAINED SOILS-UNFROZEN



(A) COARSE GRAINED SOILS-FROZEN



(B) FINE GRAINED SOILS-UNFROZEN



(B) FINE GRAINED SOILS-FROZEN

*Pakkasmäärät, roudan syvyydet ja kertoimen k arvot Kanadan lentokentillä
/McCormick 1993/.*

STATION	PAVEMENT TYPE	DOMINANT SOIL TYPE	WINTER	F. I. (°-days C)	FROST DEPTH (m)	ALPHA
Bagotville	PCC	Sand	1967/68	1667	2.29	0.056
			1968/69	1669	1.90	0.056
			1969/70	1562	2.18	0.053
Calgary	Asphalt	Clay	1964/65	1267	1.70	0.048
			1965/66	1248	1.88	0.053
			1966/67	1189	1.91	0.055
Cold Lake	PCC	Sand	1967/68	1539	2.36	0.060
			1968/69	2164	2.90	0.062
Edmonton	PCC	Clay	1964/65	1728	1.96	0.047
			1965/66	1956	2.49	0.056
			1966/67	1606	1.96	0.049
			1967/68	1214	1.88	0.054
			1968/69	2221	2.51	0.053
			1969/70	1443	2.06	0.054
Fort Nelson	Asphalt	Sand	1964/65	2800	3.28	0.062
			1965/66	2903	3.43	0.064
			1966/67	2974	3.43	0.063
			1967/68	2156	2.97	0.064
			1968/69	2959	3.43	0.063
			1969/70	2085	2.90	0.063
Fort St. John	Asphalt	Clay	1965/66	1211	1.98	0.057
			1966/67	1703	2.95	0.071
			1967/68	1405	2.84	0.076
Gimli	Asphalt	Sand	1967/68	1741	3.00	0.072
			1968/69	1889	3.05	0.070
Grande Prairie front of hangar	Asphalt	Clay	1964/65	2204	2.34	0.050
			1965/66	2064	1.91	0.042
			1966/67	1915	1.80	0.041
Grande Prairie Taxiway	Asphalt	Clay	1967/68	1413	1.85	0.049
			1965/66	2115	1.88	0.041
			1966/67	2009	1.88	0.042
Lakehead	Asphalt	Sand	1967/68	1470	1.90	0.050
			1964/65	1850	1.60	0.037
			1965/66	1286	1.37	0.038
Moose Jaw	Asphalt	Sand	1966/67	1722	1.60	0.039
			1967/68	1319	1.47	0.040
			1967/68	1139	2.49	0.074
			1968/69	1878	2.82	0.065
Namao	PCC	Sand	1969/70	1382	2.39	0.064
			1967/68	1144	2.36	0.070
Prince Albert	Asphalt	Silt, sandy	1968/69	1986	2.92	0.066
			1965/66	2507	2.64	0.053
Prince Albert taxiway	PCC	silt, sandy	1967/68	1813	2.31	0.054
			1965/66	2507	3.17	0.063
			1966/67	2544	3.07	0.061
Prince George	Asphalt	Clay	1967/68	1813	2.82	0.066
			1965/66	956	1.68	0.054
			1966/67	873	1.45	0.049
			1967/68	795	1.63	0.058
Regina	Asphalt	Clay	1964/65	2331	2.36	0.049
			1965/66	1781	1.85	0.044
			1966/67	1941	1.83	0.041
			1967/68	1354	1.88	0.051
			1968/69	1706	1.90	0.046
			1969/70	1744	1.88	0.045
Saskatoon	Asphalt	Clay	1966/67	2121	1.70	0.037
			1967/68	1432	1.78	0.047
The Pas	Asphalt	Clay	1964/65	2814	2.64	0.050
			1965/66	1993	2.23	0.050
			1966/67	2879	3.35	0.062
			1967/68	2105	3.10	0.067
			1968/69	2426	2.28	0.066
Whitehorse	PCC	Sand	1964/65	2296	3.15	0.066
			1965/66	2475	3.33	0.067
			1966/67	2494	3.38	0.068
			1967/68	1610	2.95	0.073
			1968/69	2638	3.33	0.065
			1969/70	1337	3.05	0.083
Winnipeg, location 2	PCC	Clay	1964/65	2282	1.90	0.040
			1965/66	2065	2.23	0.049
			1966/67	2178	2.21	0.047
Winnipeg, carpark	Asphalt	Clay	1967/68	1546	1.88	0.048
			1965/66	1999	1.80	0.040
			1966/67	2178	1.80	0.039
			1967/68	1685	1.70	0.041
Yellowknife	Asphalt	Sand	1964/65	2255	3.48	0.073
			1965/66	3468	4.16	0.071
			1966/67	3943	4.11	0.066
			1967/68	866	2.29	0.078

Lentokenttien maaprofiilit sekä pakkasmäärät, roudan syvyydet ja kertoimen k arvot Saskatchewan valtateillä /McCormick 1993/.

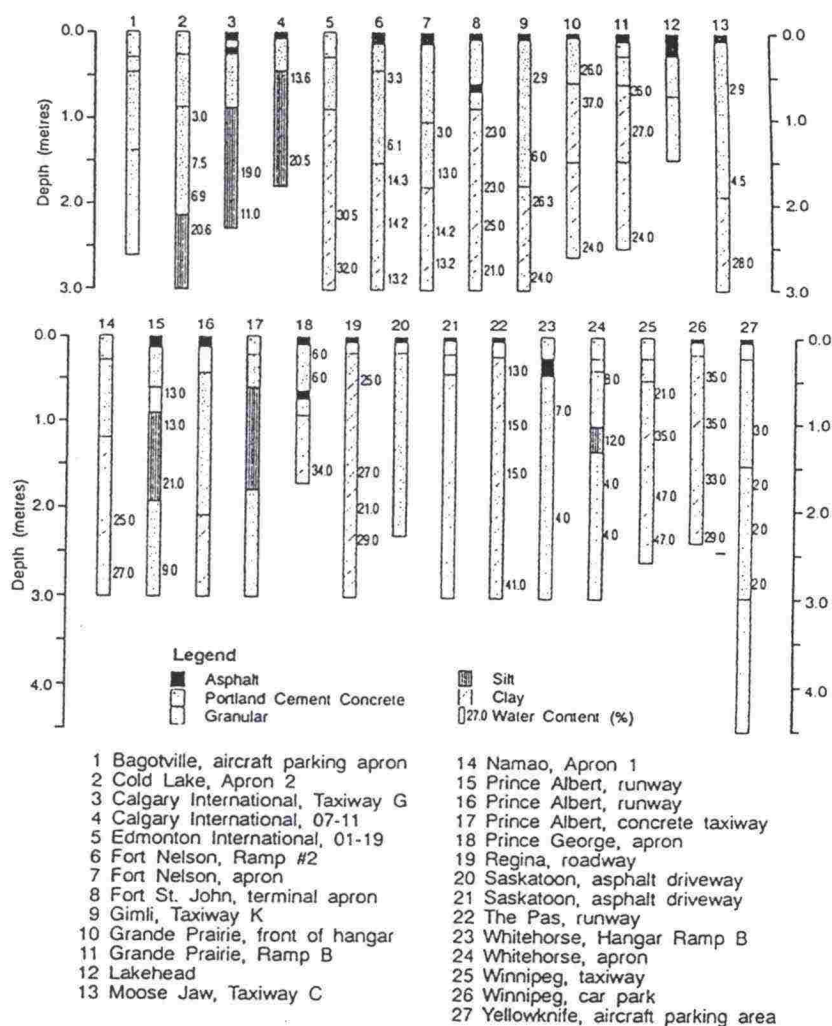


Figure 1 Soil Profiles

TABLE 2
SUMMARY OF FROST DEPTH DATA, SASKATCHEWAN HIGHWAYS

STATION	PAVEMENT THICKNESS (mm)	SOIL TYPE	WINTER	F. I. (°-days C)	FROST DEPTH (m)	ALPHA
23	254	Sand, clayey (SC)	1963/64	2 000	2.46	0.055
			1964/65	2 733	2.67	0.051
24	432	Silt, low plastic (ML)	1963/64	1 722	2.44	0.059
			1964/65	2 417	2.67	0.054
25	254	Silt, low plastic (ML)	1963/64	1 800	1.75	0.041
			1964/65	2 456	2.11	0.043
27	381	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 356	1.96	0.053
			1964/65	2 417	2.46	0.050
28	381	Clay, low plastic (CL)	1963/64	1 011	1.73	0.054
			1964/65	1 900	2.62	0.060
29	406	Clay, low plastic (CL)	1963/64	1 111	1.65	0.050
			1964/65	2 067	2.44	0.054
30	356	Silt, low plastic (ML)	1963/64	1 944	2.16	0.048
			1964/65	2 417	2.51	0.051
31	533	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 444	1.70	0.045
			1964/65	2 306	2.08	0.043
32	533	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 444	1.73	0.045
			1964/65	2 305	2.13	0.044
33	330	Clay, high plastic (CH)	1963/64	1 256	1.80	0.051
			1964/65	2 222	2.31	0.049
34	381	Clay, high plastic (CL)	1963/64	1 444	1.78	0.047
			1964/65	2 306	2.31	0.048
35	406	Clay, low plastic (CL)	1963/64	1 478	1.91	0.050
			1964/65	2 278	2.54	0.053

Particle-size characteristics of the samples.

SYMBOL	SOIL TYPE	PERCENT PARTICLES FINER THAN			UNIFORMITY COEFFICIENT	COEFFICIENT OF CURVATURE	SPECIFIC SURFACE AREA m ² /g
		# < 0.002mm	# < 0.02mm	# < 0.075mm			
O11	heavy clay	69	100	100			16.5
E32	heavy clay	70	98	100			53.0
T60	heavy clay	86	100	100			50.4
T61	heavy clay	80	100	100			35.3
T66	heavy clay	86	98	100			31.7
V73	heavy clay	64	92	96			31.1
V78	heavy clay	70	92	100			41.1
V79	heavy clay	63	82	100			12.9
T100	heavy clay	86	100	100			39.4
E33	lean clay	46	92	100			11.8
H44B	lean clay	34	62	79			17.3
H69	lean clay	36	89	100			28.7
V72	lean clay	45	94	100			29.5
O95	lean clay	45	98	100			7.5
V96	lean clay	34	76	100			20.6
V98	lean clay	34	98	100			20.6
O13	clayey silt	19	100	100	4.0	1.49	7.6
L15	clayey silt	18	70	100			5.2
L16	clayey silt	18	70	100			5.2
L17	clayey silt	18	69	100			5.2
K34	clayey silt	20	94	100	3.9	0.90	5.1
H44A	clayey silt	24	59	79	192.3	0.21	10.1
O48	clayey silt	10	44	72	20.0	1.08	5.9
O56	clayey silt	18	72	100			9.2
O57	clayey silt	19	72	95			17.8
E75	clayey silt	12	53	100	15.0	2.11	1.4
E80	clayey silt	26	70	100			12.0
J37	clayey silt	14	59	100	22.0	4.19	2.8
L14	silt	9	48	100	15.0	0.40	3.3
J36	silt	0	49	100	3.1	1.10	2.9
O49A	silt	7	30	54	26.3	1.05	3.8
S91	sandy silt	0	28	75	5.4	1.05	1.9
O9	sandy silt	4	15	72	9.0	3.63	0.8
S90	sandy silt	0	30	65	9.6	0.74	1.0
T61K	sandy silt	0	40	98	8.3	0.65	
T61S	sandy silt	0	31	98	5.8	0.69	
H44BS	sandy silt	0	23	62	6.5	0.92	
O10	silty sand	0	1	61	2.4	1.47	0.8
O31	silty sand	0	10	35	5.6	1.23	2.5
H46A	silty sand	14	26	44	233.3	9.30	18.8
O47	silty sand	4	22	56	13.5	1.53	2.4
O49B	silty sand	11	30	48	96.2	2.46	5.0
O49C	silty sand	8	18	36	51.4	3.97	1.9
O55E	silty sand	8	21	40	32.0	0.32	2.2
H92	silty sand	0	14	40	12.3	1.10	1.2
O55C	sand	5	10	23	9.5	2.63	5.2
V101	sand	0	0	3	1.7	0.95	3.3
O54A	sand	8	16	28	46.7	6.11	5.2
O55D	sand	5	10	18	15.0	2.80	2.9
O116	sand	0	0	2	1.8	0.53	
R113	silt till	13	45	72	30.8	1.56	11.8
O54B	silty sand till	6	18	34	27.7	2.31	2.0
H94	silty sand till	0	4	16	100.0	0.25	7.1
S1	silty sand till	8	18	36	83.3	2.70	10.6
K3	silty sand till	4	20	44	36.9	1.03	1.0
P5	silty sand till	7	24	34	200.0	1.13	3.8
P51	silty sand till	5	18	35	24.4	1.26	2.9
H93	silty sand till	0	17	41	16.7	0.67	1.8
K110	silty sand till	8	18	34	65.1	2.08	5.0
R114	silty sand till	3	25	42	8.3	1.05	3.6
P115	silty sand till	11	28	41	113.9	1.69	4.1
P52	sand till	3	13	28	20.0	1.93	2.9
R8	sand till	0	11	24	32.3	1.37	2.0
K111	sand till	3	10	17	36.8	2.44	1.9
R112	sand till	4	18	31	62.5	1.23	1.7
K2	gravelly sand till	0	7	22	71.4	0.35	0.6
K50	gravelly sand till	0	4	13	3.6	0.56	0.4
P4	sandy gravel till	0	0	8	74.0	0.34	1.7

Jäätymättömän veden määrä /Kujala 1991/.

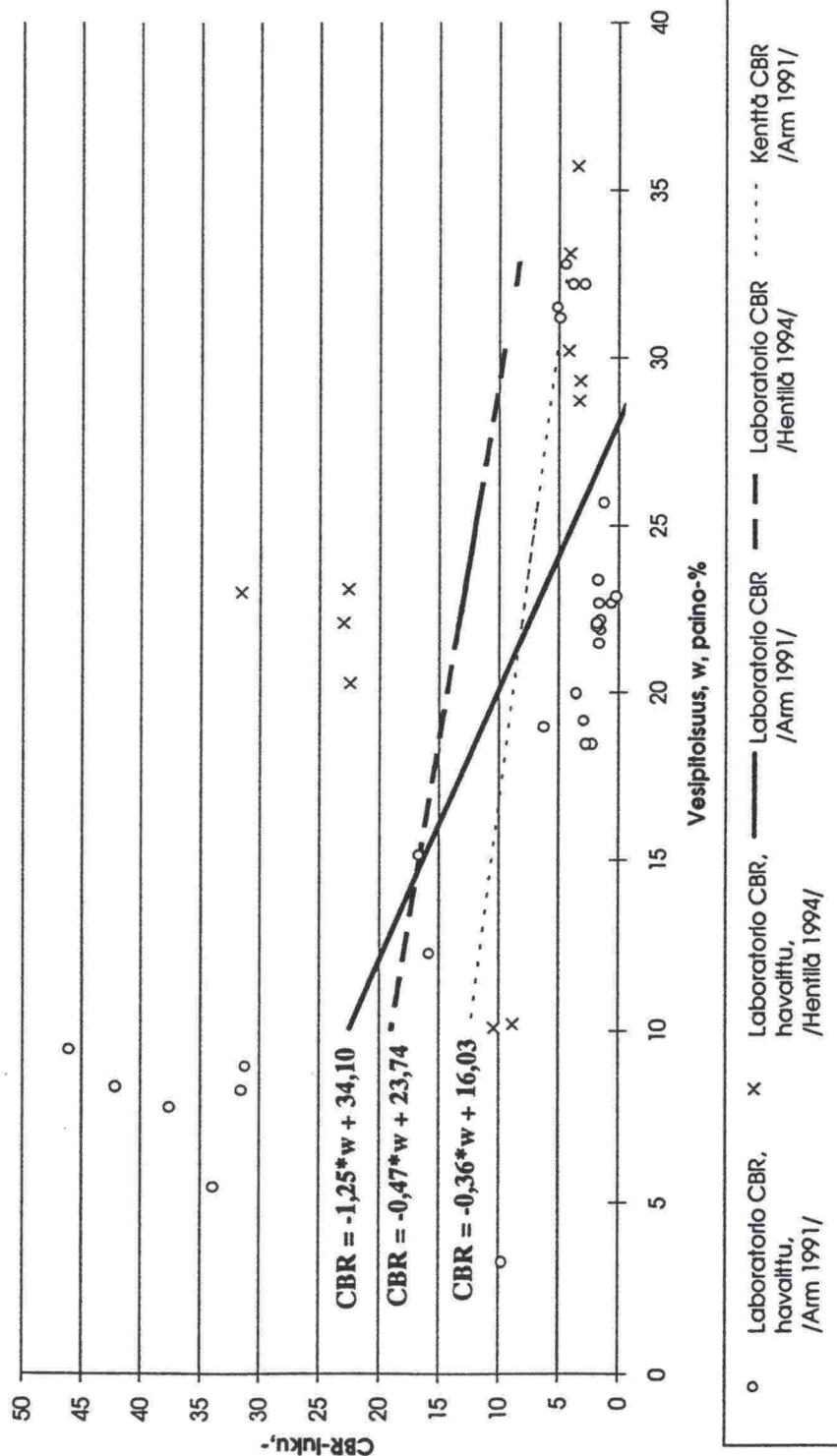
Parameters *b* and *c* of equation (25), used to indicate the amount of unfrozen water as a function of temperature, temperatures at which the unfrozen water content is 15% and 50% of total water in the sample, and the proportion of unfrozen water of total water content at temperatures of -2.0°C and -2.5°C.

Symbol	Soil type	Parameters		Temperatures at which		Unfrozen water at temperatures	
		<i>b</i>	<i>c</i>	15%	50%	$\alpha_{T=-2.0^{\circ}\text{C}}$	$\alpha_{T=-2.5^{\circ}\text{C}}$
		°C		Unfr. water °C	Unfr. water °C		
O11	heavy clay	-2.31	1.58	-3.46	-1.83	0.451	0.322
E32	heavy clay	-2.65	1.99	-3.66	-2.20	0.564	0.411
T61	heavy clay	-1.55	1.40	-2.45	-1.19	0.240	0.142
H69	lean clay	-1.44	2.63	-1.84	-1.25	0.093	0.014
V72	lean clay	-1.30	1.42	-2.04	-1.00	0.158	0.080
V98	lean clay	-1.38	2.67	-1.75	-1.06	0.052	0.008
O13	clayey silt	-2.40	2.06	-3.27	-2.01	0.504	0.337
L17	clayey silt	-1.37	1.68	-2.01	-1.10	0.151	0.064
K34	clayey silt	-2.02	2.75	-2.50	-1.77	0.378	0.165
H44A	clayey silt	-1.87	1.73	-2.72	-1.52	0.325	0.191
O48	clayey silt	-1.59	3.57	-1.90	-1.44	0.226	0.112
O56	clayey silt	-1.47	1.22	-2.48	-1.09	0.233	0.148
E75	clayey silt	-0.98	2.25	-1.30	-0.83	0.007	0.000
L14	silt	-1.05	2.55	-1.35	-0.91	0.006	0.000
O49A	silt	-1.79	2.85	-2.24	-1.57	0.254	0.075
O9	sandy silt	-1.56	2.71	-1.98	-1.36	0.141	0.028
S90	sandy silt	-1.72	3.14	-2.10	-1.52	0.200	0.039
O10	silty sand	-1.56	2.71	-1.98	-1.36	0.141	0.028
O31	silty sand	-0.95	2.09	-1.29	-0.80	0.009	0.001
H46A	silty sand	-1.28	1.65	-1.89	-1.03	0.124	0.049
O47	silty sand	-1.63	2.77	-2.05	-1.43	0.172	0.038
O54A	sand	-1.19	1.60	-1.79	-0.95	0.015	0.000
H94	silty sand till	-1.62	2.50	-2.10	-1.40	0.184	0.052
S1	silty sand till	-1.99	2.05	-2.68	-1.62	0.364	0.203
K3	silty sand till	-1.46	2.35	-1.92	-1.25	0.123	0.029
P51	silty sand till	-1.34	2.02	-1.81	-1.10	0.106	0.029
H93	silty sand till	-1.34	1.80	-1.91	-1.09	0.128	0.046
R8	sand till	-1.48	1.69	-2.16	-1.19	0.190	0.088
K2	gravelly sand till	-1.11	2.02	-1.52	-0.93	0.037	0.006
P4	sandy gravel till	-1.40	2.41	-1.83	-1.20	0.094	0.017

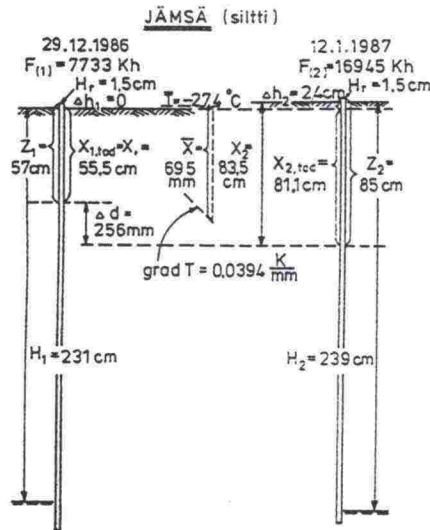
Routanousukokeiden tulokset /Kujala 1991/.

Results of constant temperature frost heave tests.

SYMBOL	SOIL TYPE	FROST HEAVE RATE	FROST HEAVE	FROST HEAVE RATIO		SEGREGATION POTENTIAL
		v_{max} mm/h	h_{max} mm	h_{se}/H	h_{se}/H	
O11	heavy clay	0.42	19.8	0.46	0.65	9.1
E32	heavy clay	0.39	22.7	0.36	0.54	10.1
T60	heavy clay	0.31	20.6	0.49	0.82	11.9
T61	heavy clay	0.22	16.7	0.33	0.46	6.4
T66	heavy clay	0.09	10.1	0.15	0.24	3.8
V73	heavy clay	0.31	16.7	0.57	0.81	6.0
V78	heavy clay	0.21	20.2	0.55	0.72	9.3
V79	heavy clay	0.52	31.0	0.40	0.58	14.2
T100	heavy clay	0.17	9.8	0.09	0.18	4.4
E33	lean clay	0.30	22.1	0.24	0.47	10.0
H44B	lean clay	0.42	28.6	0.45	0.74	9.2
H69	lean clay	0.19	15.0	0.33	0.51	3.3
V72	lean clay	0.17	13.6	0.27	0.35	3.4
O95	lean clay	0.12	12.8	0.29	0.32	3.9
V96	lean clay	0.27	17.2	0.24	0.37	7.2
V98	lean clay	0.08	4.4	0.11	0.14	2.0
O13	clayey silt	0.36	30.1	0.38	0.43	10.2
L15	clayey silt	0.18	15.7	0.21	0.23	4.2
L16	clayey silt	0.06	4.9	0.11	0.12	1.8
L17	clayey silt	0.10	7.3	0.10	0.14	2.1
K34	clayey silt	0.19	12.2	0.08	0.21	5.5
H44A	clayey silt	0.34	18.8	0.22	0.31	9.3
O48	clayey silt	0.16	18.2	0.25	0.30	5.5
O56	clayey silt	0.22	20.2	0.24	0.32	6.7
O57	clayey silt	0.50	27.4	0.35	0.44	11.5
E75	clayey silt	0.08	3.2	0.04	0.05	0.9
E80	clayey silt	0.25	18.7	0.20	0.35	5.9
J37	clayey silt	0.32	24.7	0.21	0.35	8.8
L14	silt	0.15	7.0	0.06	0.04	2.2
J36	silt	0.09	7.3	0.11	0.13	3.7
O49A	silt	0.23	9.7	0.13	0.15	6.9
S91	sandy silt	0.09	4.6	0.05	0.06	3.6
O9	sandy silt	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1
S90	sandy silt	0.08	4.7	0.13	0.16	3.1
T61K	sandy silt	0.28	15.1	0.30	0.39	6.5
T61S	sandy silt	0.08	7.4	0.44	0.48	1.1
H44BS	sandy silt	0.14	9.9	0.12	0.15	5.3
O10	silty sand	0.01	0.1	0.01	0.01	0.1
O31	silty sand	0.01	0.7	0.00	0.01	0.2
H46A	silty sand	0.11	4.4	0.02	0.04	1.2
O47	silty sand	0.03	6.6	0.11	0.12	1.6
O49B	silty sand	0.11	6.9	0.09	0.10	4.8
O49C	silty sand	0.03	2.3	0.02	0.03	1.5
O55E	silty sand	0.07	4.5	0.06	0.06	1.9
H92	silty sand	0.10	6.0	0.11	0.14	3.3
O55C	sand	0.01	1.2	0.02	0.02	0.6
V101	sand	0.02	1.0	0.01	0.00	0.1
O54A	sand	0.06	4.0	0.04	0.06	1.5
O55D	sand	0.01	1.2	0.01	0.02	0.2
O116	sand	0.01	0.1	0.01	0.01	0.0
R113	silt till	0.18	7.8	0.08	0.13	4.1
O54B	silty sand till	0.04	7.8	0.11	0.12	1.5
H94	silty sand till	0.10	3.3	0.05	0.06	1.5
S1	silty sand till	0.19	12.8	0.01	0.15	6.2
K3	silty sand till	0.07	6.4	0.06	0.07	3.5
P5	silty sand till	0.10	8.2	0.08	0.12	2.8
P51	silty sand till	0.14	12.0	0.16	0.20	5.6
H93	silty sand till	0.03	3.9	0.05	0.08	1.7
K110	silty sand till	0.08	5.6	0.08	0.09	4.9
R114	silty sand till	0.23	17.5	0.19	0.25	5.6
P115	silty sand till	0.12	6.5	0.08	0.11	5.1
P52	sand till	0.11	7.3	0.12	0.12	3.4
R8	sand till	0.15	10.6	0.05	0.12	3.7
K111	sand till	0.03	1.8	0.02	0.03	1.2
R112	sand till	0.05	3.6	0.05	0.06	2.9
K2	gravelly sand till	0.07	3.6	0.03	0.05	1.3
K50	gravelly sand till	0.01	0.8	0.01	0.01	0.1
P4	sandy gravel till	0.02	0.9	0.01	0.01	0.4



Laboratoriossa luonnontilaista näytteistä määritetyt CBR-luvut vesipitoisuuden suhteen. Kuvaajassa on lisäksi esitetty regressiosuorat sekä laboratorio että kenttä CBR-kokeen ja vesipitoisuuden välillä. Havaintoaineisto lähteistä: Arm 1991 ja Hentilä 1994.



Mitatut lähtöarvot

- roudan syvyys Z_1, Z_2
- routaputken pään korkeus maanpinnasta H_r
- pakkasmäärä $F_{(1)}, F_{(2)}$
- routanousu $\Delta h_1, \Delta h_2$
- pohjavedenpinnan syvyys maanpinnasta H_1, H_2
- $Z_1 = 57 \text{ cm}$ $Z_2 = 85 \text{ cm}$
- $H_r = 1,5 \text{ cm}$
- $F_{(1)} = 7733 \text{ Kh}$, $F_{(2)} = 16945 \text{ Kh}$
- $\Delta h_1 = 0 \text{ mm}$, $\Delta h_2 = 24 \text{ mm}$
- $H_1 = 231 \text{ cm}$, $H_2 = 239 \text{ cm}$

Määritetyt lähtöarvot

- tilavuuspaino γ
- vesipitoisuus w
- kyllästysaste S_r
- huokoisuus n
- jäätyneessä maassa sulana pysyvän veden määrä w_u
- $\gamma = 18,9 \text{ kN/m}^3$; taulukko 3
- $w = 28,4 \%$; taulukko 3
- $S_r = 95,4 \%$; taulukko 3
- $n = 44,4 \%$; taulukko 3
- $w_u = 0,05$; kuva 73
- $\gamma_w = 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Lasketaan:

- todellinen roudan syvyys aikuperäisessä maaprofiilissa (vertaa kuva 52):

$$\begin{cases} X_{1,\text{tod}} = Z_1 - H_r - \Delta h_1 = 57 \text{ cm} - 1,5 \text{ cm} - 0 = 55,5 \text{ cm} \\ X_{2,\text{tod}} = Z_2 - H_r - \Delta h_2 = 85 \text{ cm} - 1,5 \text{ cm} - 2,4 \text{ cm} = 81,1 \text{ cm} \end{cases}$$
- aika Δt : Δt on 29.12.1986 - 12.1.1987 $\Rightarrow \Delta t = 336 \text{ h}$
- ajassa Δt jäätyneen maakerroksen alkuperäinen paksuus on Δd : $\Delta d = X_{1,\text{tod}} - X_{2,\text{tod}} = 811 \text{ mm} - 555 \text{ mm} = 256 \text{ mm}$
- maanpinnan keskimääräinen jäätyneessä kerroksessa lämpötila aikavälillä Δt on \bar{T} : $\bar{T} = \frac{F_{(2)} - F_{(1)}}{\Delta t} = \frac{16945 \text{ Kh} - 7733 \text{ Kh}}{336 \text{ h}} \Rightarrow \bar{T} = -27,4 \text{ °C}$
- keskimääräinen jäätyneen maakerroksen paksuus on \bar{X} : $\bar{X} = \frac{Z_1 + Z_2}{2} - H_r = \frac{570 \text{ mm} + 850 \text{ mm}}{2} - 15 \text{ mm} \Rightarrow \bar{X} = 695 \text{ mm}$
- keskimääräinen lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa aikavälillä Δt on $\text{grad } T$: $\text{grad } T = \frac{\bar{T}}{\bar{X}} = \frac{-27,4 \text{ °C}}{695 \text{ mm}} \Rightarrow \text{grad } T = 0,0394 \frac{\text{K}}{\text{mm}}$
- kaava (33) $\Rightarrow \Delta h_i = 0,09 \cdot 0,444 \cdot 0,954 \cdot \frac{28,4 - 100 \cdot 0,05}{28,4} \cdot 256 \text{ mm} = 8,04 \text{ mm}$
- kaava (34) $\Rightarrow v = \frac{1}{1,09} \cdot \frac{24 \text{ mm} - 8,04 \text{ mm}}{336 \text{ h}} = 0,0475 \frac{\text{mm}}{\text{h}}$
- kaava (32) $\Rightarrow SP = \frac{h}{0,0394 \text{ K}} = 1,2056 \frac{\text{mm}}{\text{h} \cdot \text{K}} \Rightarrow SP = 1,2 \frac{\text{mm}^2}{\text{Kh}}$

Lasketaan kuormitus:

- pintakuorma, q_p
- jäätyneen maan osuus: $\bar{X}_{\text{tod}} \cdot \gamma = \frac{X_{1,\text{tod}} + X_{2,\text{tod}}}{2} \cdot \gamma = \frac{0,555 \text{ m} + 0,811 \text{ m}}{2} \cdot 18,9 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 12,91 \text{ kPa}$
- lisäveden osuus: $v \cdot \Delta t \cdot \gamma_w = 0,0475 \frac{\text{mm}}{\text{h}} \cdot 336 \text{ h} \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 0,16 \text{ kPa}$
- $\Rightarrow q_p = \bar{X}_{\text{tod}} \cdot \gamma + v \cdot \Delta t \cdot \gamma_w = 12,91 \text{ kPa} + 0,16 \text{ kPa} = 13,07 \text{ kPa} \Rightarrow q_p = 13,1 \text{ kPa}$
- imusta aiheutuva lisäkuorma q_i
- roudan syvyys maanpinnasta: $\begin{cases} X_1 = Z_1 - H_r = 57 \text{ cm} - 1,5 \text{ cm} = 55,5 \text{ cm} \\ X_2 = Z_2 - H_r = 85 \text{ cm} - 1,5 \text{ cm} = 83,5 \text{ cm} \end{cases}$
- kaava (35) $\Rightarrow q_i = (2,31 \text{ m} - 0,555 \text{ m}) \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} + (2,39 \text{ m} - 0,835 \text{ m}) \cdot 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \Rightarrow q_i = 33,1 \text{ kPa}$
- kokonaiskuorma q
- kaava (36) $\Rightarrow q = 13,1 \text{ kPa} + 33,1 \text{ kPa} \Rightarrow q = 46,2 \text{ kPa}$

TIEHALLITUKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 20/1992 Vanhojen tienrakennekerrosten uudelleen käyttö. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 26/1992 Kalliomurskeiden käyttö sitomattomissa rekennekerroksissa, esiselvitys. Oulun tuotantotekninen kehitysyksikkö
- 42/1992 Pehmeikölle perustettavan tiepenkereen geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 43/1992 Pehmeikölle rakennettavien tieleikkausten geotekniset laskelmat. Geopalvelukeskus
- 44/1992 Saven varaan perustetut alikulkukäytävät. Geopalvelukeskus

TIELAITOKSEN SISÄISIÄ JULKAISUJA

- 32/1993 V-poikkileikkaus ja teräsverkot tierakenteissa; Tulokset V-poikkileikkauksen ja teräsverkkojen käyttökokeista tien pituussuuntaisten halkeamien ehkäisyssä. TIEL 4000043
- 48/1993 Geopalveluiden maksu- ja mittausperusteet; Geopalveluyksiköiden tuloslaskelmat. TIEL 4000049

TIELAITOKSEN TUTKIMUKSIA

- 4/1992 Tiepenkereen holvautuminen, loppuraportti. TIEL 3100005
- 5/1993 Arktinen tienrakentaminen, Kilpisjärven hankkeen yhteenveto. TIEL 3100011

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 1/1992 Pystyjanauhojen laatuvaatimukset; laadunvalvonta ja testausmenetelmät. TIEL 3200057
- 31/1992 Pohjaveden maatiivistesuojan tiivistäminen. TIEL 3200086
- 46/1992 Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. TIEL 3200099
- 62/1992 Hienoaineksen vaikutus stabiloidun moreenimurskeen pakkauskäytävyyteen. TIEL 3200112
- 68/1992 Tien pohja- ja päällysrakenteet -tutkimusohjelma (TPPT), perussuunnitelma. TIEL 3200118
- 69/1992 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus. TIEL 3200119
- 78/1992 PTM-auton tuottamien tunnuslukujen käyttökelpoisuus ja vertailtavuus sekä niiden yhteys Laser-mittauksiin (IRI, IRI4, PI/Laser). TIEL 3200134
- 8/1993 Sitomattoman kantavan kerroksen rakentaminen. TIEL 3200135
- 15/1993 Masuunikuonan käyttö sitomattomissa päällysrakennekerroksissa. TIEL 3200142
- 16/1993 Betonipäällysteen seuranta; Vt 4 Kempele-Kiviniemi, seurantaraportti nro 1. TIEL 3200144
- 19/1993 Teiden kuntoa ja palvelutasoa koskeva seurantatutkimus. TIEL 3200145
- 20/1993 Moreeni ja sen käyttö. TIEL 3200146
- 26/1993 Bentoniittimattojen ja muovikavojen kelpoisuus pohjaveden suojaukseen, tutkimuksia ja suosituksia. TIEL 3200152
- 34/1993 Kalliomurskeiden tiivistyminen ja hienoneminen, esitutkimus. TIEL 3200159

TIELAITOKSEN SELVITYKSIÄ

- 36/1993 Palaturpeen käyttö lämmöneristeenä, raportti koerakenteiden rakentamisesta. TIEL 3200161
- 38/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Kirjallisuusselvitys. TIEL 3200163
- 39/1993 Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet; Esiselvitysvaiheen kuormituskokeet. TIEL 3200164
- 40/1993 Teiden tasaisuusmittareiden vertailu; PTM:n, Roadmanin ja Dipstickin laitevertailu sekä epätasaisuuksien vaikutus tierasitukseen. TIEL 3200165
- 41/1993 Stabiloituneen materiaalin maksimiraekoon sekä koekappaleen koon ja muodon vaikutus puristuslujuuteen. TIEL 3200166
- 47/1993 Väsymissuorat tierakenteen mitoitusta varten. TIEL 3200172
- 59/1993 Valtatien 3 routamitoitus routanousun mukaan välillä Riihimäki P - Virala. TIEL 3200184
- 60/1993 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1991-1992; Pohjaveden pinnan vaikutus, tienpinnan taipumamittaus eri lämpötiloissa, vertailu standardi paripyörä - Neste Oy:n kantavuusradan pyörä. TIEL 3200185
- 68/1993 Kuitukankaat tienrakennuksessa; Uudistetun VTT-GEO luokituksen mukaiset laatuvaatimukset. TIEL 3200193
- 71/1993 Nonwoven Geotextiles in Road Constructions. TIEL 3200193E
- 76/1993 Rakennettujen ja perusparannettujen teiden tasaisuus 1992-1993. TIEL 3200200
- 77/1993 Moreenin jalostaminen. TIEL 3200201
- 81/1993 Vt 12 Veittotensuon syvästabilointi, tutkimusraportti. TIEL 3200205
- 82/1993 Emulsiopäällysteiden suunnittelu ja rakentaminen. TIEL 3200206
- 4/1994 Strategic Highway Research Program (SHRP) - Long-Term Pavement Performance (LTPP); Materiaalimodulin määrittäminen takaisinlaskentaohjelmalla sekä tierakenteen vaurioitumisajankohdan ennustemallit. TIEL 3200213
- 7/1994 Tien pohja- ja päällysrakenteet, tutkimusohjelma (TPPT). Tutkimusohjelma vuosille 1994-2000. TIEL 3200218
- 8/1994 Roudan vaikutusten mallintaminen. TIEL 3200219
- 12/1994 Jännitys- ja muodonmuutosmittaukset tierakenteessa 1992-1993. Roudan sulamisen simulointi, pohjaveden pinnan vaikutus korkeassa lämpötilassa ja päällysteen reunan vaikutus. TIEL 3200223
- 24/1994 Tien pohja- ja päällysrakenteet - tutkimusohjelma (TPPT); Työn toiminta- ja laatusuunnitelma vuodelle 1994. TIEL 3200234
- (Geotekniikan informaatiojulkaisuja:)*
- 2/1993 Massanvaihto. TIEL 3200127
- 21/1993 Pengerpaalutus. TIEL 3200147
- 23/1993 Pohjanvahvistusmenetelmän valinta. TIEL 3200149
- 24/1993 Tiegeotekniikan yleiset mitoitusperusteet. TIEL 3200150

ISSN 0788-3722
ISBN 951-47-8741-2
TIEL 3200219